



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE MORFOLOGIA E PATOLOGIA

PRISCILA POLAQUINI DE MACEDO LEITE

**Avaliação do lodo de estação de tratamento de esgoto como meio carreador
e de proteção do agente de controle biológico *Trichoderma harzianum* para
aplicação na agricultura**

SÃO CARLOS, SP

2026

PRISCILA POLAQUINI DE MACEDO LEITE

Avaliação do lodo de estação de tratamento de esgoto como meio carreador e de proteção do agente de controle biológico *Trichoderma harzianum* para aplicação na agricultura

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Centro de Ciências Biológicas e Saúde da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Clovis Wesley Oliveira de Souza
Departamento de Morfologia e Patologia,
Laboratório de Microbiologia e Parasitologia, LMP/UFSCar

Coorientador: Dr. Caue Ribeiro de Oliveira Embrapa
Instrumentação
São Carlos - SP

SÃO CARLOS, SP

2026

Leite, Priscila Polaquini de Macedo

Avaliação do lodo de estação de tratamento de esgoto como meio carreador e de proteção do agente de controle biológico *Trichoderma harzianum* para aplicação na agricultura / Priscila Polaquini de Macedo Leite -- 2026.
25f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Clovis Wesley Oliveira de Souza

Banca Examinadora: Clovis Wesley Oliveira de Souza, Mariana Govoni Brondi Wolf, Ricardo Bortoletto Santos

Bibliografia

1. Proteção UV. 2. Lodo de esgoto. I. Leite, Priscila Polaquini de Macedo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E SAÚDE

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de curso do candidato Priscila Polaquini de Macedo Leite, realizada em 08/07/2026:

Prof. Dr. Clovis Wesley Oliveira de Souza
Laboratório de Microbiologia e Parasitologia, LMP/UFSCar

Dra. Mariana Govoni Brondi Wolf
Embrapa Instrumentação, São Carlos – SP

Dr. Ricardo Bortoletto Santos
Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto-SP

AGRADECIMENTOS

Ao Caue Ribeiro de Oliveira, por me aceitar na Embrapa e acreditar no meu trabalho.

Ao Clóvis Wesley Oliveira de Souza, pelo apoio acadêmico ao longo do processo.

À Raquel Cardoso, pelo apoio e indicação ao Caue.

Ao Ricardo Bortoletto e à Mariana Brondi, pelo acompanhamento, mentoria e conhecimentos compartilhados.

Aos colegas do laboratório de Nanocompósitos da Embrapa, que me ensinaram, me apoiaram e tornaram meus dias mais leves, em especial a Nathália, a Heloisa e o Vinicius.

Aos meus amigos pelo companheirismo e por nunca medirem esforços para me apoiar nas horas mais difíceis, em especial a Camila e a Nathalia.

Ao Dalton, meu esposo, amigo e conselheiro, que nunca me deixou desistir dos meus sonhos e sempre esteve comigo em todos os momentos.

Aos meus familiares, em especial a minha mãe, Wilma, a minha sobrinha, Bruna, e a minha irmã, Andresa, que nunca duvidaram da minha capacidade e sempre me apoiaram em tudo.

A mim mesma e a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica e trajetória de vida.

RESUMO

A crescente demanda por alimentos, impulsionada pelo aumento populacional, tem intensificado a necessidade de sistemas agrícolas mais produtivos e ambientalmente sustentáveis, visto que os sistemas convencionais podem trazer sérios riscos ao meio ambiente e à saúde humana. Nesse contexto, os biodefensivos surgem como alternativas promissoras aos agroquímicos convencionais, destacando-se os fungos do gênero *Trichoderma*, amplamente reconhecidos por sua capacidade de controle biológico de fitopatógenos e de promoção do crescimento vegetal. Entretanto, quando aplicados nas partes aéreas das plantas, esses microrganismos apresentam sensibilidade à radiação ultravioleta e às variações térmicas, fatores que reduzem sua viabilidade e eficácia. Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver um grânulo à base de lodo de esgoto para incorporação do agente de controle biológico *Trichoderma harzianum*, avaliando seu potencial como matriz carreadora e barreira física à radiação UV, podendo ser sua aplicação tanto na forma de dispersão aquosa para pulverização na fitosfera quanto na forma de grânulos íntegros diretamente no solo. Os grânulos foram produzidos utilizando lodo de esgoto e glicerol, sendo posteriormente caracterizados quanto às propriedades físico-químicas, mecânicas e biológicas. O material apresentou biocompatibilidade com o fungo, não ocasionando a formação de halo de inibição e permitindo o crescimento e a colonização do meio pelo microrganismo após o processo de granulação. Além disso, os grânulos apresentaram elevada resistência mecânica, com força máxima média de compressão de $21,46 \pm 1,24$ N e perda de massa de aproximadamente 0,1% em ensaio de abrasão. A análise por espectroscopia UV-Vis revelou elevada absorção na região ultravioleta, especialmente entre 260 e 350 nm, sugerindo potencial para atuar como barreira parcial à radiação incidente. Dessa forma, os resultados indicam que o lodo de esgoto apresenta potencial para atuar como matriz carreadora de *Trichoderma harzianum*, contribuindo para o desenvolvimento de formulações agrícolas mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da economia circular, como a valorização de resíduos e a devolução de nutrientes ao solo em ciclos biológicos.

Palavras-chave: lodo de esgoto, *Trichoderma*, proteção UV.

ABSTRACT

The growing demand for food, driven by population growth, has intensified the need for more productive and environmentally sustainable agricultural systems due to the environmental and human health risks associated with conventional agricultural practices. In this context, biocontrol agents have emerged as promising alternatives to conventional agrochemicals, particularly fungi of the *Trichoderma* genus, which are widely recognized for their ability to control phytopathogens and promote plant growth. However, when applied to the aerial parts of plants, these microorganisms are sensitive to ultraviolet radiation and temperature fluctuations, factors that reduce their viability and effectiveness. Therefore, this study aimed to develop a sewage sludge-based granule for the incorporation of the biocontrol agent *Trichoderma harzianum*, evaluating its potential as a carrier matrix and as a physical barrier against UV radiation, for application either as a water-based suspension pulverized onto the phyllosphere or as whole granules applied directly to the soil. The granules were produced using sewage sludge and glycerol and were subsequently characterized regarding their physicochemical, mechanical, and biological properties. The material exhibited biocompatibility with the fungus, causing no inhibition halo formation and allowing fungal growth and colonization after the granulation process. Furthermore, the granules showed high mechanical resistance, with an average maximum compressive force of 21.46 ± 1.24 N and a mass loss of approximately 0.1% in the abrasion test. UV-Vis spectroscopy analysis revealed high absorption in the ultraviolet region, particularly between 260 and 350 nm, suggesting the potential of the material to act as a partial barrier against incident UV radiation. Overall, the results indicate that sewage sludge has potential as a carrier matrix for *Trichoderma harzianum*, contributing to the development of more sustainable agricultural formulations aligned with the principles of the circular economy, such as waste valorization and the return of nutrients to the soil.

Keywords: sewage sludge; *Trichoderma harzianum*; biocontrol agents; UV protection.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	8
1.1	BIODEFENSIVOS E INOCULANTES MICROBIANOS	9
1.2	<i>TRICHODERMA</i> COMO BIODEFENSIVO.....	9
1.3	O LODO DE ESGOTO.....	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	GERAL	12
2.2	ESPECÍFICOS	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1	MATERIAIS	13
3.2	TESTE DE COMPATIBILIDADE	13
3.3	DESENVOLVIMENTO DOS GRÂNULOS.....	13
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS GRÂNULOS.....	14
3.5	PRODUÇÃO DE SUSPENSÃO DE <i>TRICHODERMA</i>	15
3.6	INOCULAÇÃO DAS CEPAS DE <i>TRICHODERMA</i> NO LODO	15
3.7	ENSAIO PRELIMINAR DE VIABILIDADE DAS CEPAS	15
3.8	ANÁLISE DE DADOS DO TESTE DE COMPRESSÃO	16
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5	CONCLUSÃO	23
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A agricultura desempenha um papel crucial no abastecimento alimentar da população mundial. No entanto, o aumento populacional, as mudanças climáticas e os conflitos têm contribuído para o agravamento da fome e da insegurança alimentar, afastando o mundo das metas estabelecidas pelo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2, que busca erradicar a fome e todas as formas de desnutrição até 2030 (FAO *et al.*, 2024). Em resposta à crescente demanda por alimentos, houve uma intensificação do uso de agroquímicos sintéticos para o controle de pragas e doenças em diversas culturas, o que, embora tenha contribuído para o aumento da produtividade, também trouxe impactos negativos aos ecossistemas e à saúde humana, como câncer, danos ao sistema nervoso central, atraso cognitivo nas crianças, malformações, desregulação hormonal e intoxicações decorrentes de exposição crônica (DE MEDEIROS *et al.*, 2023; PANIS *et al.*, 2022).

De acordo com dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), o consumo global de fungicidas e bactericidas destinados ao uso agrícola apresentou valores estimados de 741.693 toneladas em 2020, 848.529 toneladas em 2021, 815.278 toneladas em 2022 e 778.387 toneladas em 2023 (FAOSTAT, 2025). Apesar de uma ligeira redução recente, esses números evidenciam o alto volume e a contínua dependência de defensivos químicos na produção agrícola mundial.

O uso intensivo desses pesticidas sintéticos tem provocado sérios impactos ambientais e ecológicos, com destaque para a contaminação do solo e da água e para a alteração da microbiota rizosférica, comprometendo processos essenciais como a ciclagem de nutrientes e a fixação biológica de nitrogênio. Além disso, a persistência desses compostos no ambiente pode reduzir a qualidade dos ecossistemas agrícolas e aumentar os riscos de bioacumulação, afetando a biodiversidade e a saúde humana (SHAHID; KHAN, 2022). Convém destacar também que o uso contínuo de fungicidas com o mesmo mecanismo de ação pode levar ao desenvolvimento de resistência em diversos fitopatógenos, constituindo uma séria ameaça ao controle eficaz de doenças agrícolas (YIN *et al.*, 2023). Diante desse cenário, torna-se imprescindível o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo agrícola, como o uso de biodefensivos, que apresentam menor toxicidade, maior biodegradabilidade e potencial para reduzir os impactos ambientais associados aos pesticidas convencionais, promovendo uma agricultura mais equilibrada e resiliente frente aos desafios ambientais e socioeconômicos atuais (ZHOU; LI; ACHAL, 2025).

1.1 BIODDEFENSIVOS E INOCULANTES MICROBIANOS

Os bio defensivos consistem em produtos biológicos utilizados no controle de pragas e doenças agrícolas, podendo ser classificados em macrobiológicos, que utilizam macro-organismos como insetos e ácaros, e microbiológicos, baseados em bactérias, fungos e vírus (MAPA, 2019). Já os inoculantes microbianos são formulações contendo microrganismos vivos benéficos destinadas a promover efeitos específicos nas plantas ou no solo, como fixação biológica de nitrogênio, solubilização de nutrientes, promoção do crescimento vegetal ou controle biológico. Assim, quando formulados e empregados com a finalidade de controlar fitopatógenos ou pragas agrícolas, esses produtos microbiológicos podem ser enquadrados como bio defensivos. Nesse contexto, microrganismos utilizados como agentes de controle biológico são capazes de substituir ou reduzir o uso de pesticidas químicos, promovendo a proteção das plantas por mecanismos como antibiose, competição por nutrientes e espaço, micoparasitismo e indução de resistência (BRASIL, 2023; FLORENCIO et al., 2022).

1.2 *TRICHODERMA* COMO BIODDEFENSIVO

O gênero *Trichoderma* compreende fungos filamentosos pertencentes ao filo Ascomycota, amplamente reconhecidos pela capacidade de atuar como importantes agentes de controle biológico de fitopatógenos, pois são altamente competitivos no consumo de nutrientes e oxigênio, bem como na ocupação de espaço. Entre as espécies, *Trichoderma harzianum* destaca-se como a mais utilizada na agricultura devido à sua alta versatilidade ecológica e à facilidade de cultivo em larga escala (VYNDAS-REYES et al., 2024). Essa espécie, assim como outras do gênero, apresenta diversos mecanismos de ação, como a síntese de metabólitos secundários e enzimas antimicrobianas que inibem o crescimento de diferentes patógenos; o hiperparasitismo, ou seja, a capacidade de parasitar outras espécies de fungos fitopatogênicos por meio da degradação de suas paredes celulares, feita pela secreção de enzimas quitinolíticas; além da estimulação do sistema de resistência induzida das plantas, contribuindo para que estas respondam de forma mais rápida e eficiente a ataques de microrganismos causadores de doenças (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2025).

Existem basicamente três zonas com que os vegetais interagem com suas microbiotas associadas: a rizosfera, ou seja, no solo; a endosfera, que compreende a área dos tecidos vegetais internos; e a filosfera, que é a superfície das partes aéreas das plantas, como as folhas e os frutos. Porém, como o *Trichoderma* é sensível à radiação ultravioleta e às variações de temperatura,

sua sobrevivência em ambientes expostos, como a atmosfera, tende a ser limitada. A luz UV pode causar danos ao DNA e às estruturas celulares, reduzindo a viabilidade dos conídios e, consequentemente, a eficácia do fungo quando aplicado nas partes aéreas das plantas. Além disso, flutuações térmicas podem comprometer a germinação e o metabolismo do microrganismo, afetando sua capacidade de colonização e biocontrole (GUZMÁN-GUZMÁN *et al.*, 2025).

1.3 O LODO DE ESGOTO

Segundo a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), os esgotos podem ser classificados em sanitários e industriais. Os sanitários são constituídos principalmente por despejos domésticos (provenientes de edificações que possuam instalações como banheiros, lavanderias e cozinhas), além de parcelas de águas pluviais e águas de infiltração. Por outro lado, os esgotos industriais apresentam grande diversidade, sendo originados do uso da água em atividades industriais e, por isso, adquirem características específicas de acordo com o processo produtivo e o sistema de tratamento utilizado.

Os processos de tratamento de esgoto sanitários geram, como subprodutos, areia, lixo e lodo, sendo este último o de maior volume, o que o torna um problema complexo devido a quantidade diária gerada e a logística de descarte. O lodo se encontra em forma líquida ou líquido semi-sólido, dependendo do método utilizado, e os sólidos, formados pela mistura de matéria orgânica e inorgânica, precisam ser descartados continuamente pois se acumulam no sistema e, sem a correta destinação desse material, a implantação das estações de tratamento têm seus benefícios comprometidos, além de que a retirada inadequada ou pouco frequente do lodo reduz a eficiência do tratamento (SANEPAR, 1999).

Como exemplo, a Estação de Tratamento de Esgoto Monjolinho, localizada em São Carlos (SP), que possui 254.857 habitantes, segundo o último Censo Demográfico, produz diariamente até 45 toneladas de lodo desaguado com teor de sólidos de aproximadamente 23% (SAAE SÃO CARLOS, 2023). Esse volume evidencia o desafio associado à gestão e à disposição final do lodo de esgoto que, no Brasil, é destinado mais comumente aos aterros sanitários, embora venha crescendo o interesse do lodo de esgoto pelo seu aproveitamento agrícola como alternativa mais sustentável de destinação (GONÇALVES; MOL, 2021). Nesse contexto, o estado do Paraná destaca-se como referência nacional, por meio do programa desenvolvido pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), que prioriza a

reciclagem agrícola do lodo tratado, produzindo bio sólido Classe A destinado à utilização por agricultores. Além disso, o estado de São Paulo também tem avançado nessa área, com iniciativas como o fertilizante orgânico Sabesfértil, desenvolvido pela SABESP a partir de lodo de esgoto tratado (GONÇALVES; MOL, 2021).

Dessa forma, esses dados reforçam a importância da exploração de estratégias de reaproveitamento de resíduos sanitários com o objetivo de minimizar os impactos associados à crescente geração desses materiais e à sua destinação final, promovendo os princípios da economia circular, como, segundo Ellen Macarthur Foundation (2024), a valorização de resíduos e o retorno de nutrientes ao solo. Além disso, o manejo correto do lodo contribui também para o desenvolvimento sustentável em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11, 12 e 15 estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), sendo o de número onze sobre tornar as cidades e os assentamentos humanos resilientes e sustentáveis; o de número doze relacionado ao consumo e produção responsáveis; e o de número quinze sobre a vida terrestre – proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres (Organização das Nações Unidas, 2015).

De modo geral, o lodo, oriundo de esgoto sanitário, é um material predominantemente orgânico, de cor marrom escuro, rico em matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e outros macro e micronutrientes, podendo atuar como condicionador e fertilizante do solo. Além disso, possui propriedades físicas importantes, como elevada capacidade de retenção de água e influência na estruturação do solo. O pH geralmente varia entre levemente ácido e neutro, dependendo do processo de tratamento empregado. Após estabilização e secagem, ocorre aumento no teor de sólidos totais e redução da atividade microbológica e dos odores (SANEPAR, 1999).

Porém, segundo a SANEPAR (1999), o lodo pode conter metais pesados oriundos de rejeitos domésticos, como canalizações e águas residuárias de lavagem; e águas de escoamento de superfícies metálicas ou das ruas, que podem carregar resíduos de metais dispersos na fumaça de veículos. Por isso, para sua utilização na agricultura, é importante a análise da presença de contaminantes para verificar se os valores estão de acordo com o estabelecido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), já que no Brasil o uso desse material na agricultura é regulamentado pela Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020). Outros parâmetros como sólidos totais e voláteis, teor de matéria orgânica, relação carbono/nitrogênio (C/N), umidade, pH e concentração de nutrientes também são fundamentais para avaliar a

qualidade e o potencial de utilização agrícola do lodo de esgoto domiciliar (SANEPAR, 1999).

Diante desse cenário, o desenvolvimento de novas estratégias para o aproveitamento agrícola do lodo de esgoto torna-se uma alternativa promissora para agregar valor a esse resíduo e ampliar suas possibilidades de aplicação. Nesse contexto, o emprego do lodo como matriz carreadora de microrganismos de interesse agrícola, como *Trichoderma harzianum*, representa uma abordagem capaz de aliar a valorização de um resíduo gerado em grandes quantidades à proteção e manutenção da viabilidade do agente de controle biológico. Além de contribuir para o reaproveitamento sustentável do lodo, sua composição rica em matéria orgânica, carbono, nitrogênio, fósforo, cálcio, potássio e micronutrientes pode favorecer a sobrevivência do microrganismo na matriz e, consequentemente, potencializar sua eficiência após a aplicação no solo ou sobre as partes aéreas das plantas.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Desenvolvimento de um grânulo à base de lodo de esgoto como meio carreador e de proteção do agente de controle biológico *Trichoderma harzianum*, a fim de proteger esse microrganismo contra a ação oxidante da radiação ultravioleta (UV), visando sua aplicação tanto na forma de dispersão aquosa para pulverização na fitosfera quanto na forma de grânulos íntegros diretamente no solo.

2.2 ESPECÍFICOS

- Testar a compatibilidade do lodo com o *Trichoderma*;
- Desenvolver grânulos a partir de lodo de esgoto;
- Realizar a caracterização físico-química do grânulo a partir de: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de raio-X (DRX), Espectroscopia de Refletância Difusa (UV-Vis), teste de compressão com texturômetro, microtomografia (micro-CT) e quantificação de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio (CHN);
- Testar a resistência mecânica dos grânulos;
- Produzir suspensão com esporos de *Trichoderma*;
- Incorporar os esporos do *Trichoderma* nos grânulos;
- Realizar ensaio preliminar de viabilidade do *Trichoderma* nos grânulos;
- Realizar análise estatística dos resultados do teste de compressão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Lodo de esgoto sanitário fornecido pela Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Franca; meio PDA (Potato Dextrose Agar) Neogen; glicerol ultrapuro Invitrogen; TWEEN 80 Perfyl Tech; água destilada; placas de Petri; provetas, béqueres e outras vidrarias; e suspensão de *Trichoderma harzianum* (LQC-99), a 10^7 esporos g^{-1} .

3.2 TESTE DE COMPATIBILIDADE

Inicialmente, foi realizado um teste de compatibilidade para avaliar a toxicidade do lodo de esgoto sobre o *Trichoderma harzianum*. Para isso, 100 μL da suspensão do microrganismo foram pipetados sobre a superfície de uma placa de Petri contendo meio PDA e, em seguida, espalhados com uma alça de Drigalski para obtenção de uma distribuição uniforme do inóculo. Posteriormente, 1 g de lodo de esgoto foi adicionado ao centro da placa. Após a incubação em estufa BOD a 28 °C e fotoperíodo de 12 horas, avaliou-se a presença ou ausência de halo de inibição ao redor do material, como indicativo de possível efeito tóxico sobre o fungo. Ensaio como esse são importantes durante o desenvolvimento de formulações para agentes de controle biológico, pois o material carreador não deve comprometer a viabilidade nem o crescimento do microrganismo (MARTINEZ *et al.*, 2023).

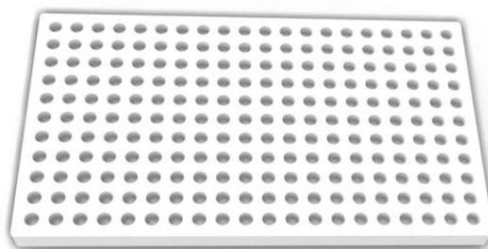
3.3 DESENVOLVIMENTO DOS GRÂNULOS

Para a utilização do lodo, este inicialmente foi autoclavado por 40 minutos a 121 °C e 1,2 bar de pressão em autoclave vertical (AV75 Phoenix) para esterilização. Posteriormente, foi seco em estufa com circulação interna de ar (Tecnal) a 80 °C por três dias e, depois, moído até se transformar em um pó fino de coloração marrom-escuro acinzentado.

Para a formulação dos grânulos, optou-se pela utilização da própria solução de extração empregada na preparação da suspensão de *Trichoderma harzianum*, composta por 20% de glicerol e 0,02% de TWEEN 80. Essa escolha teve como objetivo utilizar o glicerol como agente ligante na formação dos grânulos, visto que já era um componente presente na formulação destinada à incorporação do microrganismo, evitando a adição de novos insumos ao processo. Assim, os grânulos foram feitos na proporção de 1:1, ou seja, uma parte de lodo de esgoto seco para uma parte de solução de extração. Posteriormente, a mistura de 10 g de lodo com 10 mL de solução foi espalhada em fôrma de silicone com 220 cavidades arredondadas (Fig. 1) para

a modelagem dos grânulos (Fig. 2) e posterior secagem em estufa (Tecnal) com circulação interna de ar a 30 °C por 24 horas. Após a secagem, o rendimento foi de 11,54 g de grânulos. O aumento de massa em relação ao lodo inicial é atribuído principalmente ao glicerol incorporado e retido na matriz, uma vez que a água da solução foi removida durante o processo de secagem.

Figura 1 – Fôrma para modelagem dos grânulos



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 2 – Grânulos de lodo e glicerol.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS GRÂNULOS

A micromorfologia do material foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), sendo as amostras fixadas previamente em fitas de carbono e revestidas com uma camada fina de ouro em uma câmara de ionização (BALTEC Med. 020). Foi utilizado o modo de elétron secundário para a obtenção das imagens em 5 kv e 2500 de magnitude. A análise de microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) foi realizada através de um equipamento ZEISS Xradia Versa 610 (ZEISS, Alemanha). Os padrões de difração foram obtidos por Difração de Raios X (DRX) em um difratômetro Shimadzu XRD 6000, operando com radiação Cu K α ($\lambda = 0,1546$ nm). As análises foram feitas no intervalo de 4 a 70° (2 θ),

registrando-se a intensidade dos picos em uma varredura contínua de 2° min^{-1} , sob condições operacionais de 30 kV de tensão e 30 mA de corrente.

A absorção na região UV-Vis do grânulo foi avaliada por espectroscopia de reflectância difusa (DRS), utilizando-se um espectrofotômetro UV-Vis 2600 Shimadzu equipado com acessório para reflectância difusa. Os espectros foram obtidos na faixa de 200 a 600 nm, com resolução espectral de 1 nm, sendo os resultados expressos em termos de absorbância e reflectância em função do comprimento de onda. O teste de compressão, para análise da resistência do material através da medição da fratura e da flexibilidade, foi realizado em um texturômetro Extralab TA.XT/PlusC com probe cilíndrica de aço inoxidável P/6 (6mm). Já a análise de quantificação de CHN (Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio) foi realizada em Analisador Elementar CHN2400 PerkinElmer.

Com o objetivo de avaliar a capacidade dos grânulos de manter sua integridade durante o manuseio e o transporte, foi realizado um ensaio de abrasão. Para isso, 1 g de grânulos de lodo foi colocado em um tubo Falcon de 50 mL contendo pequenas esferas de vidro, de 2,5 mm de diâmetro, e submetido à agitação em vórtex por 5 minutos na velocidade máxima do aparelho da marca Gehaka. O ensaio foi conduzido em triplicata.

3.5 PRODUÇÃO DE SUSPENSÃO DE *TRICHODERMA*

A suspensão de *Trichoderma harzianum* (10^7 esporos g^{-1}) usada para a inoculação nos grânulos foi produzida a partir da solução com esporos fornecida pela Embrapa Meio Ambiente. Para isso, 100 μL da suspensão foram pipetadas no centro de uma placa de Petri com meio PDA (Potato Dextrose Ágar) e espalhadas uniformemente com alça de Drigalski em todo o meio. A extração dos esporos da placa foi feita após 7 dias de incubação em estufa BOD com fotoperíodo de 12 horas a uma temperatura de 28°C , a partir da pipetagem de 5 mL de solução de extração (20% glicerol com 0,02% TWEEN 80) e raspagem do meio com a alça de Drigalski até total desprendimento do material. Então, essa suspensão foi filtrada em gaze e, posteriormente, distribuída em criotubos de 5 mL para armazenagem em freezer a -20°C . Para a produção de 30 mL de suspensão foram necessárias aproximadamente 12 placas inoculadas com *Trichoderma* e, conseqüentemente, 60 mL de solução de extração.

3.6 INOCULAÇÃO DAS CEPAS DE *TRICHODERMA* NO LODO

A suspensão de *Trichoderma harzianum* (10^7 esporos g^{-1}) foi misturada ao lodo seco na proporção aproximada de 1:1, sendo 10 g de lodo e 10 mL de suspensão. Após a mistura completa, o material foi espalhado em fôrma de silicone e, posteriormente, levado para secagem

em estufa com circulação interna de ar (Tecnal) a 30 °C por 24 horas.

3.7 ENSAIO PRELIMINAR DE VIABILIDADE DAS CEPAS

Foi realizado um pré-teste de viabilidade para avaliar a presença de *Trichoderma* nos grânulos. Para isso, foi posicionado um grânulo na região central de uma placa de Petri contendo meio PDA e, posteriormente, essa placa foi incubada em estufa BOD com fotoperíodo de 12 horas a 28 °C por 7 dias, sendo observada diariamente para acompanhamento do crescimento do microrganismo. Este ensaio foi repetido três vezes.

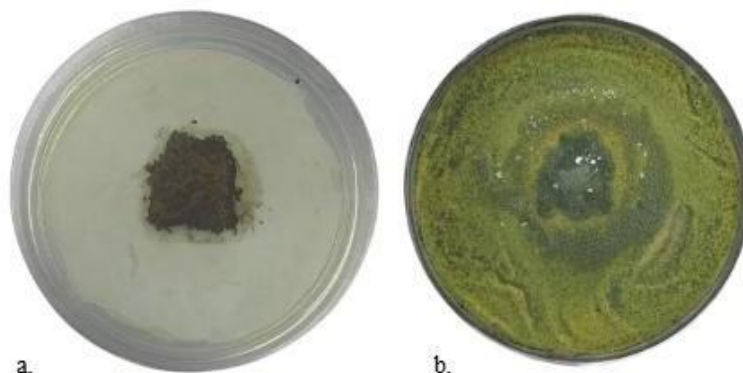
3.8 ANÁLISE DE DADOS DO TESTE DE COMPRESSÃO

Os dados obtidos nos ensaios de compressão realizados no texturômetro foram exportados e processados para a obtenção das curvas de força em função do deslocamento da probe durante a compressão dos grânulos. As análises estatísticas e a elaboração dos gráficos foram realizadas no software R (R Core Team, 2025). Para cada réplica experimental, foi determinado o valor máximo de força suportada pelo material, correspondente à resistência máxima à compressão. Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão, calculados a partir de dez réplicas independentes. A variabilidade entre as amostras foi avaliada pelo coeficiente de variação (CV), calculado como a razão entre o desvio padrão e a média dos valores obtidos, expresso em porcentagem. Adicionalmente, foi determinado o intervalo de confiança de 95% (IC95%) para a resistência máxima à compressão, visando estimar a precisão da média obtida. A normalidade da distribuição dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As curvas força $\times$ deslocamento foram utilizadas para avaliar qualitativamente a uniformidade do comportamento mecânico dos grânulos produzidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro ensaio feito foi o teste de biocompatibilidade do lodo com o *Trichoderma*, o qual resultou positivamente visto que nenhum halo de inibição foi formado (Fig. 3), ou seja, o fungo cresceu por toda a placa, cobrindo o material.

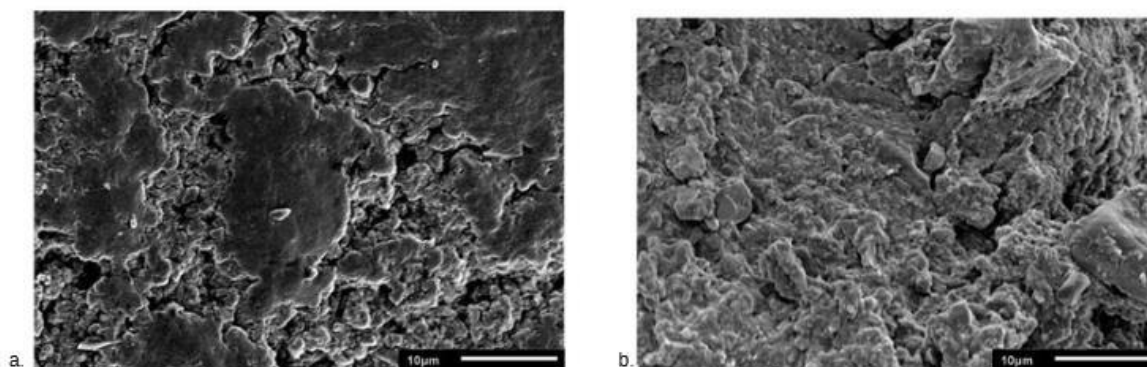
Figura 3 – Crescimento de *Trichoderma harzianum* sobre lodo de esgoto em meio PDA durante o teste de biocompatibilidade. (a) Dia 1; (b) Dia 7.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

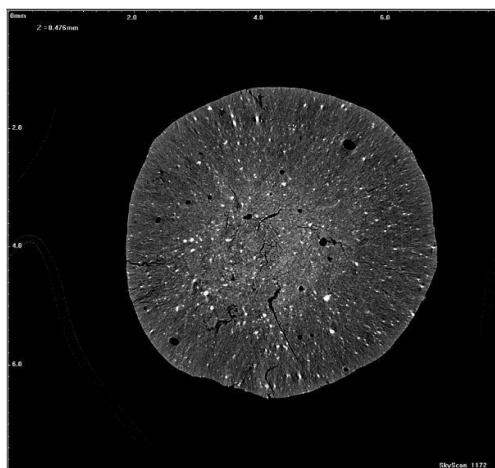
As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia foram realizadas em grânulos sem inoculação de *Trichoderma harzianum*. O material apresentou estrutura homogênea e compacta, com baixa porosidade (regiões escuras) dentro do limite de detecção do equipamento (Figs. 4 e 5), não conferindo vantagem ao microrganismo, já que este se aloja nos espaços livres da matriz. Para a MEV, os grânulos tiveram dois tipos de preparação. Na primeira, o grânulo foi fixado inteiramente no *stub* (Fig. 4a) com a parte superior, que fica em contato com a fôrma, voltada para cima. Na segunda, 5 grânulos foram triturados em cadinho até a obtenção de um pó constituído por diversos tamanhos de partículas (Fig. 4b), permitindo assim a observação da morfologia interna do material. Para a microtomografia, utilizou-se um grânulo íntegro.

Figura 4 – Fotos de microscopia eletrônica de varredura em 2.500 x e 5kv. (a) grânulo inteiro; (b) Partículas do grânulo.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

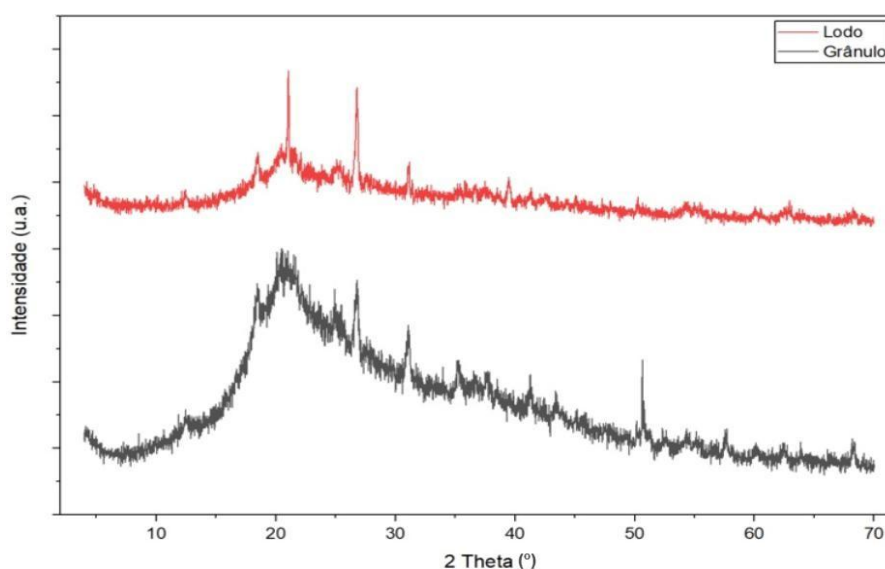
Figura 5 – Seção transversal de um grânulo de lodo de esgoto (diâmetro aproximado de 5 mm) obtida por microtomografia. A escala está apresentada em milímetros (mm), com marcações de 2 mm.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Em relação ao DRX (difração de raios X), o difratograma do grânulo (Fig. 6) manteve as reflexões cristalinas observadas no lodo original, indicando a preservação das fases minerais presentes. Entretanto, verificou-se um aumento na intensidade da região amorfa, evidenciado por um halo difuso entre 15 e 30° em 2 θ . Esse comportamento sugere que a incorporação de glicerol promoveu um aumento da desordem estrutural da matriz, sem alterar significativamente as fases cristalinas originais.

Figura 6 – Difratogramas de raios X (DRX) do lodo de esgoto e do grânulo formulado com glicerol.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A análise da composição elementar (CHN) do grânulo (Tabela 1) demonstrou teores médios de carbono, hidrogênio e nitrogênio de $34,26 \pm 1,51\%$, $5,07 \pm 1,01\%$ e $5,20 \pm 0,23\%$, respectivamente. Esses resultados confirmam a elevada fração orgânica do material e são compatíveis com a composição de materiais carbonáceos derivados de biomassa e resíduos orgânicos, frequentemente empregados em aplicações ambientais e agrícolas (HE et al., 2023; VILLORA-PICÓ et al., 2024). Nesse contexto, a matéria orgânica desempenha um papel fundamental na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, favorecendo a agregação das partículas, a retenção de água e a capacidade de troca catiônica. Além disso, materiais ricos em carbono podem atuar como suporte para microrganismos benéficos, contribuindo para sua sobrevivência e estabelecimento após a aplicação no solo (LEHMANN; JOSEPH, 2015; BRADY; WEIL, 2017; PAUL, 2015).

TABELA 1 – Composição elementar do grânulo de lodo com glicerol

Amostra	Peso da amostra (mg)	Composição elementar (%)		
		Carbono (C)	Hidrogênio (H)	Nitrogênio (N)
Amostra 1	9,26	35,33	5,78	5,36
Amostra 2	11,47	33,19	4,35	5,03

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O teste de resistência mecânica (Fig. 7) demonstrou que os grânulos apresentaram elevada resistência à abrasão, com perda de massa de aproximadamente 0,1% após o ensaio, indicando potencial para suportar as etapas de manuseio, transporte e aplicação sem sofrer desintegração significativa. Além disso, na análise de compressão realizada em texturômetro, a baixa dispersão entre as curvas de compressão das diferentes réplicas (Fig. 8) sugere elevada reprodutibilidade do processo de produção dos grânulos e boa uniformidade das propriedades mecânicas obtidas.

Os resultados obtidos nos ensaios de abrasão e de compressão são complementares e indicam que os grânulos apresentam não apenas resistência ao desgaste superficial, mas também capacidade de suportar cargas compressivas sem perda significativa de sua integridade estrutural. O desempenho mecânico observado sugere que o glicerol tenha tido papel fundamental na formulação, atuando simultaneamente como agente ligante e plastificante. Como ligante, favorece a formação de interações intermoleculares e aumenta a coesão entre

as partículas de lodo, contribuindo para a formação de grânulos estruturalmente estáveis. Como plastificante, promove maior mobilidade molecular e reduz a fragilidade da matriz, conferindo maior flexibilidade e resistência mecânica ao material (GONZÁLEZ *et al*, 2020). Em conjunto, esses efeitos podem explicar a elevada tolerância dos grânulos ao manuseio, transporte e armazenamento, características desejáveis para sua aplicação agrícola.

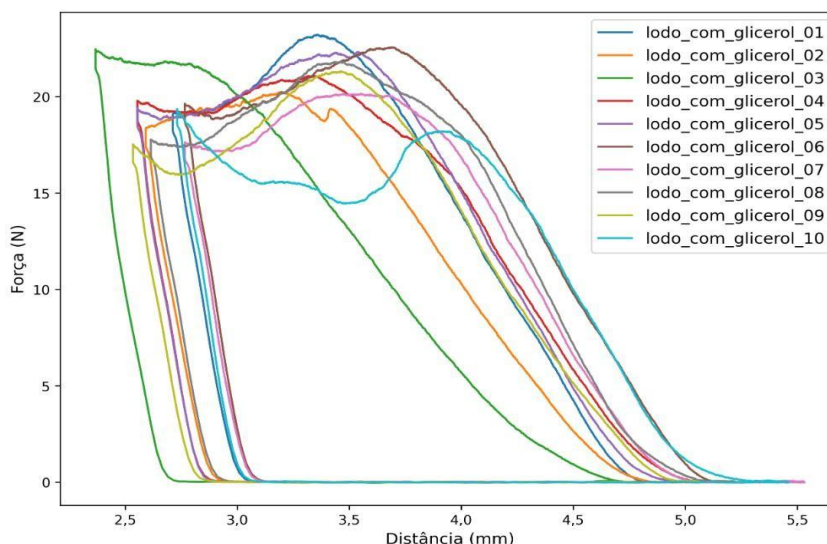
Figura 7 – Falcon com grânulos e esferas de vidro em vórtex para teste de abrasão



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 8 – Curvas de compressão dos grânulos de lodo de esgoto contendo glicerol, obtidas por ensaio em texturômetro.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).



Sobre a análise dos resultados do texturômetro, apresentados na Tabela 2, a força máxima média suportada pelos grânulos foi de $21,46 \pm 1,24$ N, com coeficiente de variação de

5,79%, o que evidencia elevada uniformidade mecânica entre as réplicas produzidas. A força de ruptura é um importante indicador da resistência mecânica de materiais granulados, pois está diretamente relacionada à sua capacidade de resistir às condições de manuseio, armazenamento e transporte. De acordo com Reddy *et al.* (2018), convertendo-se a força máxima média obtida para quilograma-força (kgf), o valor corresponde a aproximadamente 2,19 kgf, situando-se acima do limite associado à fácil fragmentação ($<1,5$ kgf) e dentro da faixa de 1,5 a 2,5 kgf, considerada adequada para grânulos destinados à aplicação agrícola, embora ainda possa requerer alguns cuidados durante o manuseio. Esses resultados indicam que os grânulos produzidos apresentam resistência mecânica compatível com sua utilização prática.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk não indicou desvios significativos em relação à distribuição normal ($p = 0,763$), sugerindo boa consistência do processo de granulação. Além disso, o intervalo de confiança de 95% para a resistência máxima à compressão variou de 20,57 a 22,34 N, reforçando a reprodutibilidade das propriedades mecânicas obtidas.

TABELA 2 – Parâmetros estatísticos obtidos a partir do ensaio de compressão dos grânulos produzidos a partir de lodo de esgoto e glicerol.

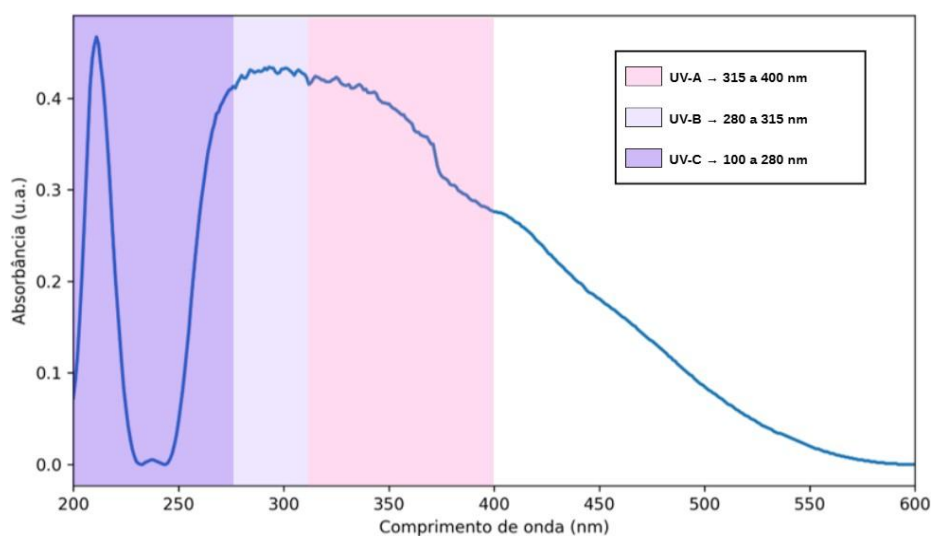
Parâmetro	Resultado
Número de réplicas	10
Força máxima média	21,46 N
Desvio padrão	1,24 N
Coefficiente de variação (CV)	5,79%
IC95%	20,57 – 22,34 N
Shapiro-Wilk (W)	0,958
Shapiro-Wilk (p)	0,763

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O espectro de absorbância obtido por espectroscopia UV-Vis de reflectância difusa (Fig. 9) revelou elevada absorção de radiação na região UV-C, apresentando um máximo próximo de 210 nm. Além disso, o material manteve valores relativamente elevados de absorbância ao longo da faixa compreendida entre aproximadamente 260 e 350 nm, correspondente a parte das regiões UV-C e UV-A e toda a região da UV-B. A partir da região visível do espectro, observou-se uma redução gradual da absorbância, com valores próximos de zero em 600 nm. Esses resultados sugerem que o grânulo possui potencial para atuar como barreira física parcial à radiação ultravioleta incidente, característica desejável em sistemas de encapsulação de

microrganismos fotossensíveis, como *Trichoderma harzianum*.

Figura 9 – Espectro de absorvância UV-Vis obtido por espectroscopia de reflectância difusa do grânulo formulado com lodo de esgoto e glicerol.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Para avaliar a viabilidade preliminar do *Trichoderma harzianum* após o processo de granulação, foi realizado um teste de pré-viabilidade, no qual um grânulo inoculado com o fungo foi posicionado no centro de uma placa de Petri contendo meio batata-dextrose-água (PDA). As placas foram incubadas em estufa BOD com fotoperíodo de 12 horas a 28 °C e o desenvolvimento micelial foi acompanhado ao longo do período experimental, com registros fotográficos realizados nos dias 1, 3, 5 e 7 de incubação (Fig. 10). Assim, foi observado que grânulo manteve o microrganismo vivo, não interferindo em seu desenvolvimento.

Figura 10 – Evolução do crescimento de *Trichoderma harzianum* em meio PDA a partir do grânulo inoculado: (a) dia 1; (b) dia 3; (c) dia 5; e (d) dia 7 de incubação.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

5 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a utilização de solução extratora 20% glicerol e 0,02% TWEEN 80, deposição em fôrma de silicone e posterior secagem em estufa foi eficaz para a obtenção de grânulos uniformes, compactos e com resistência mecânica com capacidade de suportar uma força média de 21,46 N e resistir à abrasão em ensaio de agitação em vórtex. Além disso, associado à baixa variabilidade entre as réplicas, há indicação de elevada uniformidade e reprodutibilidade do processo de produção.

A incorporação do glicerol promoveu aumento da fração amorfa da matriz sem alterar significativamente as fases minerais presentes no lodo original, como demonstrado pela análise em DRX, além de contribuir para a coesão estrutural dos grânulos produzidos. A partir da análise elementar realizada pelo Analisador Elementar CHN2400 indicou que os grânulos possuem uma alta concentração de carbono, ou seja, são compatíveis com materiais carbonáceos derivados de resíduos orgânicos, amplamente utilizados em aplicações ambientais e agrícolas. A partir dos resultados obtidos por espectroscopia de reflectância difusa, pode-se inferir que o material apresenta capacidade de absorção da radiação ultravioleta na faixa aproximada de 200 a 400 nm, o que sugere potencial para atuar como barreira parcial à incidência de radiação UV sobre o inóculo de *Trichoderma*.

Dessa forma, o lodo de esgoto apresenta potencial para atuar como matriz carreadora do agente de controle biológico *Trichoderma harzianum*, constituindo uma alternativa promissora para o desenvolvimento de formulações agrícolas mais sustentáveis. O material apresentou biocompatibilidade com o fungo, não ocasionando a formação de halo de inibição, além de permitir o crescimento e a colonização do meio pelo microrganismo após o processo de granulação, evidenciando a manutenção de sua viabilidade biológica.

Em conjunto, os resultados obtidos sugerem que os grânulos produzidos apresentam características favoráveis para aplicação agrícola, aliando valorização de resíduos, economia circular e desenvolvimento de tecnologias voltadas à redução da dependência de agroquímicos sintéticos. Entretanto, estudos adicionais avaliando a capacidade do grânulo em preservar a viabilidade do *Trichoderma harzianum* ao longo do tempo de armazenamento, bem como sua proteção frente à exposição à radiação ultravioleta e às variações de temperatura, além da manutenção de sua eficiência no controle de fitopatógenos, ainda são necessários para validar

a aplicabilidade da tecnologia desenvolvida em condições reais de utilização.

Os resultados obtidos reforçam, ainda, a importância da exploração de estratégias de manejo e reaproveitamento de resíduos sanitários como alternativas para minimizar os impactos associados à crescente geração desses materiais e à sua destinação final. Nesse contexto, o presente estudo contribui para o avanço do desenvolvimento de materiais obtidos a partir de resíduos de baixo valor agregado e sua conversão em produtos de maior valor tecnológico e econômico, promovendo os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável, em consonância com os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), por incentivar alternativas aos agroquímicos sintéticos; ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), por promover a valorização do lodo de esgoto e a economia circular; e ao ODS 17 (Parcerias e Meios de Implementação), por integrar diferentes áreas do conhecimento e fortalecer a cooperação entre universidade e instituição de pesquisa.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de estudos que avaliem a estabilidade da formulação durante o armazenamento, a capacidade do grânulo de preservar a viabilidade do *T. harzianum* ao longo do tempo e sua eficiência na proteção contra a radiação ultravioleta e variações de temperatura. Além disso, ensaios em casa de vegetação e em campo poderão confirmar o desempenho agrônomo da formulação, bem como sua eficácia no controle de fitopatógenos e na promoção do desenvolvimento vegetal.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. New York: Pearson, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 ago. 2020. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=726>. Acesso em: 9 jul. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Mercado de bio defensivos cresce mais de 70% no Brasil em 2018. **MAPA**, Brasília, DF, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/2022/feffmercado-de-bio defensivos-cresce-em-mais-de-50-no-brasil>>. Acesso em: 29 maio 2026.

BRONDI, M. G.; FLORENCIO, C.; VASCONCELLOS, V. M. *et al.* Enhancing the Shelf Life

and Stress Tolerance of the Biocontrol Agent *Trichoderma harzianum* by Encapsulation in Green Matrices of Nanocellulose and Carboxymethyl Cellulose. **ACS Agricultural Science & Technology**, v. 5, p. 1178–1188, 2025. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1021/acsagscitech.5c00189>>. Acesso em: 26 nov. 2025.

CHAGAS, R. F.; SAIKI, P. T. O. Manual prático para análise do potencial antagonista microbiano (teste de confronto ou antagonismo). **Instituto Federal de Goiás (IFG) - Câmpus Goiânia**, Goiânia, [s.d.]. Disponível em:

<https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/2588/1/pte_Ronney%20Chagas.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2026.

DE MEDEIROS, A.O.; DA SILVA, M.D.G.C.; CONVERTI, A. et al. Development of Natural Fungicidal Agricultural Defensives Using Microbial Glycolipid and Vegetable Oil Blends. **Surfaces**, [s.l.], 2024, v. 7, p. 879-897. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/surfaces7040058>>. Acesso em: 08 nov. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular economy principles. 2024. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-principles>>. Acesso em: 9 jul. 2026.

FAOSTAT. Pesticides Use. **Food and Agriculture Organization Of The United Nations**. Item «Fungicides and Bactericides», Area «World», anos 2020-2023. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>>. Acesso em: 10 nov. 2025.

FLORENCIO, C.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; FAVARO, C. P. *et al.* Avanços na Produção e Formulação de Inoculantes Microbianos Visando uma Agricultura mais Sustentável. **Química Nova**, [s.l.] v. 45, p. 1133-1145. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170909>>. Acesso em: 20 maio 2026.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2024. The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. **FAO**, Roma, 2024. Disponível em:

<<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/39dbc6d1-58eb-4aac-bd8a-47a8a2c07c67/content/cd1254en.html#gsc.tab=0>>. Acesso em: 01 maio 2026.

FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of Sewage Sludge in EU Application of Old and New Methods—A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 116–140, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>>. Acesso em: 25 jun. 2026.

GONÇALVES, D. B.; MOL, M. P. G. Destinação final de lodo de esgoto: proposição para auxílio em tomadas de decisão a partir de uma revisão de literatura. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 14, n. 1, p. 90–106, 2021. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Artigo_Destinacao-final-de-lodo-de-esgoto_revisao-de-literatura.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2026.

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; ETESAMI, H.; SANTOYO, G. Trichoderma: a multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. **BMC Microbiology**, [s.l.], v. 25, 2025. Disponível em: <<https://bmcmicrobiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12866-025-04158-2>>. Acesso em: 10 nov. 2025.

HE, H.; ZHANG, R.; ZHANG, P.; WANG, P.; CHEN, N.; QIAN, B.; ZHANG, L.; YU, J.; DAI, B. Functional Carbon from Nature: Biomass-Derived Carbon Materials and the Recent Progress of Their Applications. **Advanced Science**, [s.l.], v. 10, n. 16, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/advs.202205557>>. Acesso em: 25 jun. 2026.

MARTINEZ, Y.; RIBERA, J.; SCHWARZE, F. W. M. R.; FRANCE, K. DE. Biotechnological development of Trichoderma-based formulations for biological control. **Springer**, [s.l.], v. 107, n. 18, 2023. Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10439859/>>. Acesso em: 11 jul. 2026.

MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; DA SILVA, J. C. Trichoderma: uso na agricultura. **Embrapa**, Brasília-DF, 2019. 538 p. ISBN 978-85-7035-943-8.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **Casa ONU Brasil**, Brasília, DF, 15 set. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 9 jul. 2026.

PANIS, C.; KAWASSAKI, A. C. B.; CRESTANI, A. P. J. *et al.* Evidence on Human Exposure to Pesticides and the Occurrence of Health Hazards in the Brazilian Population: A Systematic Review. **Frontiers in Public Health**, Lausanne, v. 9, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.787438>>. Acesso em: 9 jul. 2026.

PAUL, E. A. **Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry**. 4. ed. Amsterdam: Academic Press, 2015.

REDDY, B. S.; DHIMATE, A. S.; VENKATESH, G. *et al.* Physio-mechanical Properties of Biochar Granules. **Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development**, Hyderabad, v. 33, n. 2, p. 22–30, 2018. Disponível em: <<https://indianjournals.com/article/ijdard-33-2-004>>. Acesso em: 02 maio 2026.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE SÃO CARLOS (SAAE). Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Monjolinho. **SAAE São Carlos**, São Carlos, 2023. Disponível em: <<https://saaesaocarlos.com.br/servicos/esgoto/estacao-de-tratamento-de-esgoto-ete/>>. Acesso em: 19 jun. 2026.

SANEPAR. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. **SANEPAR; PROSAB**, Curitiba-PR, 1999. Disponível em: <https://legacy.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/uso_manejo_lodo_agricultura.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2026.

SHAHID, M.; KHAN, M. S. Ecotoxicological Implications of Residual Pesticides to Beneficial Soil Bacteria: A Review. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, [s.l.], v. 188, 2022. Acesso em: <<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105272>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

VILLORA-PICÓ, J. J.; GONZÁLEZ-ARIAS, J.; BAENA-MORENO, F. M.; REINA, T. R. Renewable Carbonaceous Materials from Biomass in Catalytic Processes: A Review. **Materials**, [s.l.], v. 17, n. 3, p. 565, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17030565>. Acesso em: 25 jun. 2026.

VINDAS-REYES, E.; CHACÓN-CERDAS, R.; RIVERA-MÉNDEZ, W. Trichoderma Production and Encapsulation Methods for Agricultural Applications. **AgriEngineering**, [s.l.], v. 6, p. 2366-2384, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-7402/6/3/138>. Acesso em: 10 nov. 2025.

WANG, Y.; QIAO, Y.; XU, G. et al. Synergistic Effect and Water-Dispersible Tablet of Propamidine and Flusilazole Against Botrytis cinerea. **Plant Disease**, [s.l.], v. 109, 8 set. 2025. Disponível em: <<https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PDIS-01-25-0153-RE>>. Acesso em: 27 nov. 2025.

YIN, Y; MIAO, J; SHAO, W. *et al.* Fungicide Resistance: Progress in Understanding Mechanism, Monitoring, and Management. **Phytopathology**, v. 13, 4 maio 2023. Disponível em: <<https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD>>. Acesso em: 10 jul. 2026.

ZHOU, W.; LI, M.; ACHAL, V. A Comprehensive Review on Environmental and Human Health Impacts Of Chemical Pesticide Usage. **Emerging Contaminants**, [s.l.], v. 11, 2025. ISSN 2405-6650. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410>. Acesso em: 11 nov. 2025.