

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA: CONDICIONAMENTO BIOLÓGICO DO SOLO

NATHÁLIA SILVA RODOVALHO

***TRICHODERMA ASPERELLUM* CCT – 7830 COMO BIOINSUMO NA
ATIVIDADE BIOQUÍMICA DO SOLO E PARA A PRODUÇÃO E
NUTRIÇÃO DO SORGO**

UBERLÂNDIA

2025

NATHÁLIA SILVA RODOVALHO

***TRICHODERMA ASPERELLUM* CCT – 7830 COMO BIOINSUMO NA
ATIVIDADE BIOQUÍMICA DO SOLO E PARA A PRODUÇÃO E
NUTRIÇÃO DO SORGO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo

UBERLÂNDIA

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R695 Rodovalho, Nathalia Silva, 1997-
2025 TRICHODERMA ASPERELLUM CCT - 7830 COMO BIOINSUMO NA
ATIVIDADE BIOQUÍMICA DO SOLO E PARA A PRODUÇÃO E
NUTRIÇÃO DO SORGO [recurso eletrônico] / Nathalia Silva
Rodovalho. - 2025.

Orientador: Lucas Carvalho Basílio de Azevedo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.129>
Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Azevedo, Lucas Carvalho Basílio de,
1980-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 003/2025, PPGAGRO				
Data:	Vinte e um de fevereiro de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	08:22	Hora de encerramento:	10:50
Matrícula do Discente:	12312AGR011				
Nome do Discente:	Nathália Silva Rodovalho				
Título do Trabalho:	TRICHODERMA ASPERELLUM CCT - 7830 COMO BIOINSUMO NA ATIVIDADE BIOQUÍMICA DO SOLO E PARA A PRODUÇÃO E NUTRIÇÃO DO SORGO				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Gilberto de Oliveira Mendes - UFU; Diva de Souza Andrade - IDR Paraná; Lucas Carvalho Basílio de Azevedo - orientador do(a) candidato(a) e Doutora Luciana Alves de Sousa - UFU

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu à(ao) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir a senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Carvalho Basílio de Azevedo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/02/2025, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto de Oliveira Mendes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/02/2025, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diva de Souza Andrade, Usuário Externo**, em 21/02/2025, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Alves de Sousa, Técnico(a) de Laboratório**, em 21/02/2025, às 15:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6113821** e o código CRC **2E03FEBB**.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Agradeço a empresa H.T.M. Comércio e Laboratórios de Corretivos do Solo Ltda pelo financiamento da pesquisa e fornecimento do isolado fúngico.

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Instituto de Ciências agrárias (ICIAG) pelo incentivo ao desenvolvimento científico, essencial no meu processo de formação profissional e por tudo o que aprendi ao longo dos anos no curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante os anos de curso.

Ao meu orientador, Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo, pela confiança no meu trabalho, por acreditar na minha capacidade e por seu profissionalismo, paciência e disposição para orientar.

Agradeço imensamente aos meus pais, Antônio Luiz e Luciana Maria, e ao meu irmão, Natan Luis, por estarem sempre ao meu lado, me incentivando, apoiando meus estudos e participando de cada etapa dessa jornada. Sou grata por todo amor, paciência e dedicação que tornaram esse caminho possível, mesmo nos momentos mais desafiadores.

À minha amiga e parceira de pesquisa, Geissielen Andrade Lauriuchi, minha imensa gratidão por estar ao meu lado desde o início, sempre me estendendo a mão. Mesmo à distância, sua presença foi constante, auxiliando em todas as etapas do experimento e na escrita desta tese. Sou profundamente grata por tudo e sinto que lhe devo muito. Agradeço, também, as minhas amigas Marina Homaied e Thais Jesus por estarem ao meu lado ao longo desta trajetória.

Meu agradecimento ao Professor Doutor Maurício Martins pelo conhecimento compartilhado e pela disposição em auxiliar no experimento. Estendo minha gratidão a todos os técnicos de laboratório e aos técnicos e funcionários da Fazenda Glória pelo suporte prestado.

Aos membros da banca, pela flexibilidade e contribuições ao trabalho.

A Deus, fonte infinita de inspiração, força e sabedoria, dedico cada passo desta jornada. Sem Sua presença constante e orientação, nada disso seria possível. Que este trabalho reflita, ainda que de forma humilde, a gratidão por Suas bênçãos e a fé que me guia.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	HIPÓTESE.....	17
2	OBJETIVOS	17
2.1	Geral	17
2.2	Específicos	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	Biologia do solo: caminhos para a sustentabilidade agrícola	18
3.2	Qualidade do Solo: Atividades Enzimáticas e Indicadores Biológicos	19
3.3	Bioinsumos	20
3.4	Cultura do sorgo	21
3.5	<i>Trichoderma asperellum</i>	22
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.4	Localização do experimento em campo	24
4.5	Preparo do solo	26
4.6	Delineamento experimental	27
4.4	Preparo e aplicação da suspensão com <i>Trichoderma asperellum</i>	28
4.5	Semeadura.....	28
4.6	Acompanhamento do experimento	29
4.7	Parâmetros avaliados	29
4.7.1	Fertilidade do solo, nutrição do sorgo e massa seca da parte aérea	29
4.7.2	Produtividade.....	30
4.7.3	Respiração Basal do Solo (RBS).....	30
4.7.4	Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (CBMS) e quociente metabólico do solo (qCO ₂)	31
4.7.5	Potencial enzimático do solo	33
4.8	Estatística	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Massa seca da parte aérea da cultura do sorgo	35
5.2	Produtividade.....	36
5.3	Fertilidade do solo	37
5.4	Nutrição do sorgo	39
5.5	Atividades enzimáticas e indicadores biológicos do solo.....	41
6	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de localização da cidade de Uberlândia (MG), onde foi realizado o experimento. 24
- Figura 2.** Localização das áreas de instalação do experimento: Área 1 (em amarelo) com solo de textura média, nas coordenadas ($18^{\circ}57'13.85''\text{S}$ e $48^{\circ}12'38.74''\text{O}$); e a Área 2 (em azul) com solo argiloso nas coordenadas ($18^{\circ}56'56.62''\text{S}$ e $48^{\circ}12'33.74''\text{O}$). 25
- Figura 3.** Volume de precipitação e temperatura média registrados nos meses de instalação e operação do ensaio, com dados da estação automática do INMET em Uberlândia (507). 26
- Figura 4.** Delineamento esquemático de tratamentos e parcelas experimentais nas áreas 1 (à esquerda) – solo de textura média e 2 (à direita) – solo de textura argilosa. 27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da análise de fertilidade inicial do solo coletado nas áreas 1 (solo de textura média) e 2 (solo argiloso), destinadas ao cultivo de sorgo. Uberlândia, março de 2023.	26
Tabela 2. Massa seca da parte aérea da cultura do sorgo coletada nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.	35
Tabela 3. Produtividade da cultura do sorgo coletada nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.	37
Tabela 4. Parâmetros analisados da fertilidade do solo coletado nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.	37
Tabela 5. Parâmetros analisados da nutrição do sorgo coletado nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.	39
Tabela 6. Parâmetros analisados da atividade enzimática, respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (CBMS) e quociente metabólico (qCO ₂) das áreas de solo de textura média e solo argiloso.	41

LISTA DE ABREVIACÕES

ACB – Agente de controle biológico

Al – Alumínio

B – Boro

BaCl₂ – Cloreto de bário

C – Carbono

Ca – Cálcio

CaCl₂ – Cloreto de cálcio

CBM-S – Carbono da biomassa microbiana do solo

C_{ORG} – Carbono orgânico

CTC – Capacidade de troca de cátions

CT-ARG – Controle em solo de textura argilosa

CT-MED – Controle em solo de textura média/arenosa

Cu – Cobre

DBC – Delineamento em Blocos Casualizado

FDA – Diacetato de Fluoreceína

Fe – Ferro

FMA – Fungos Micorrizicos Arbusculares

FPCV – Fungos Promotores de Crescimento Vegetal

GEE – Gases do Efeito Estufa

H⁺Al – Acidez potencial

HCl – Ácido Clorídrico

K – Potássio

K₂Cr₂O₇ – Dicromato de potássio

K₂SO₄ – Sulfato de potássio

Mg – Magnésio

Mn – Manganês

MO – Matéria Orgânica

Mo – Molibdênio

MUB – Tampão universal modificada

N – Nitrogênio

NaOH – Hidróxido de sódio

NPK – Adubo formulado de nitrogênio, fósforo e potássio

P – Fósforo

PNG – P-Nitrophenyl-B-D-glucosidase

PNP – P-nitrofenil fosfato

PNS – P-nitrofenil sulfato

qCO₂ – Quociente metabólico

RBS – Respiração Basal do Solo

S – Enxofre

SB – Soma de bases trocáveis

SS – Superfosfato simples

T – Capacidade de troca de cátions

THAM – Trometamol; tris-hydroxymethyl aminomethane

TR - ARG – *Trichoderma asperellum* em solo de textura argilosa

TR - MED – *Trichoderma asperellum* em solo de textura média/arenosa

V% – Saturação por bases

Zn – Zinco

RESUMO

O sistema produtivo agrícola de alto escala utiliza predominantemente mecanização, insumos sintéticos ou da mineração para ajuste da fertilidade do solo e para a fitossanidade. Essas práticas têm potencial de degradar funções do solo e da água. Adicionalmente, há os custos financeiros e energéticos para a obtenção e aplicação dos manejos tradicionais. Dessa forma, a busca por alternativas sustentáveis objetiva melhorar a eficiência produtiva, diminuir a dependência externa e os impactos ambientais. Nesse contexto, destaca-se o uso de microrganismos benéficos como os fungos do gênero *Trichoderma*, que mineralizam nutrientes, controlam doenças e pragas, e promovem o crescimento das plantas. Este estudo avaliou o potencial do *Trichoderma asperellum* CCT-7830 como bioinsumo para estimular a atividade biológica, a biomassa microbiana no solo, a fertilidade do solo, a nutrição, o crescimento e a produtividade do sorgo a campo. O experimento foi conduzido em Uberlândia, com delineamento em blocos casualizado, em esquema fatorial 2 x 2: 2 tratamentos [controle (CT) e aplicação de *T. asperellum* (TR)] em dois solos [Latossolo Vermelho Distrófico típico, um de textura média (MED) e outro argiloso (ARG)]. O isolado microbiano foi aplicado na linha de semeadura antes e após a semeadura. A atividade bioquímica do solo foi medida pela respiração basal (RBS), quociente metabólico (qCO_2), carbono da biomassa microbiana (CBMS) e atividade de arilsulfatase, β -glicosidase, fosfatase, e hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA). As análises estatísticas englobaram testes de normalidade, homogeneidade e aditividade. Dados de distribuição normal foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e teste de média de Scott-Knott ($p < 0,05$). Para dados não paramétricos, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). A aplicação do isolado de *T. asperellum* aumentou a atividade de hidrólise do FDA e de fosfatase nos dois solos, e o valor de qCO_2 no solo de textura média, e atividade de arilsulfatase e CBMS no argiloso. O tratamento fúngico aumentou a acidez potencial (H+Al) no solo de textura média. O uso do isolado microbiano diminuiu a atividade de β -glicosidase e a RBS no solo argiloso. Os tratamentos não afetaram significativamente a massa seca e a produtividade do sorgo. O *Trichoderma asperellum* CCT-7830 demonstrou potencial como bioinsumo, melhorando a atividade enzimática, tanto em solo argiloso como de textura média, indicando que seu uso pode ser uma estratégia eficaz para práticas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: microrganismos, sustentabilidade, práticas agrícolas

ABSTRACT

The large-scale agricultural production system predominantly relies on mechanization and synthetic or mining-derived inputs to adjust soil fertility and ensure plant health. These practices have the potential to degrade soil and water functions. Additionally, there are financial and energy costs associated with obtaining and applying traditional management practices. Therefore, the search for sustainable alternatives aims to improve production efficiency, reduce external dependence, and minimize environmental impacts. In this context, the use of beneficial microorganisms, such as fungi of the genus *Trichoderma*, stands out, as they mineralize nutrients, control diseases and pests, and promote plant growth. This study evaluated the potential of *Trichoderma asperellum* CCT-7830 as a bio input to stimulate biological activity, soil microbial biomass, soil fertility, plant nutrition, growth, and sorghum yield in the field. The experiment was conducted in Uberlândia using a randomized block design in a 2×2 factorial scheme: two treatments [control (CT) and application of *T. asperellum* (TR)] in two soil types [a typical Dystrophic Red Latosol, one with medium texture (MED) and another with clayey texture (ARG)]. The microbial isolate was applied in the sowing row before and after sowing. Soil biochemical activity was assessed by measuring basal respiration (RBS), the metabolic quotient (qCO_2), the soil microbial biomass carbon (CBMS) and the activities of arylsulfatase, β -glucosidase, phosphatase, and fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis. Statistical analyses included tests for normality, homogeneity, and additivity. For data that followed a normal distribution, we performed Analysis of Variance (ANOVA) and the Scott-Knott mean test ($p < 0.05$). For non-parametric data, the Kruskal-Wallis test was used ($p < 0.05$). Applying *T. asperellum* isolate increased FDA hydrolysis and phosphatase activity in both soils, as well as qCO_2 in medium-textured soil and arylsulfatase and CBMS activity in clayey soil. The fungal treatment increased potential acidity (H+Al) in medium-textured soil. The microbial isolate reduced β -glucosidase activity and RBS in clayey soil. However, the treatments did not significantly affect sorghum dry mass and yield. *Trichoderma asperellum* CCT-7830 demonstrated potential as a bio input by enhancing enzymatic activity in both clayey and medium-textured soils, indicating that its use may be an effective strategy for more sustainable agricultural practices.

Keywords: microorganisms, sustainability, agricultural practices

1 INTRODUÇÃO

Os solos são fundamentais para a subsistência humana por meio do fornecimento de alimentos, água doce, além de desempenhar diversos outros serviços ecossistêmicos (IPCC, 2019). Trata-se de um componente essencial para a biosfera terrestre que contribui de maneira complexa e interativa para o desempenho de funções e, portanto, para a saúde do ecossistema. O solo purifica e regula o ciclo da água, participa dos ciclos de nutrientes, principalmente via atividade biológica, constituindo-se em um reservatório de genes e espécies altamente diversos (Gavrilescu, 2021). Atua como um sumidouro e emissor de carbono global, desempenhando um papel crucial na regulação das mudanças climáticas e de seus impactos (Azevedo *et al.*, 2024). Além disso, os solos sustentam cerca de 90% da produção de alimentos, rações, fibras e combustíveis, preservando, ainda, vestígios do passado, contribuindo significativamente para o patrimônio cultural da humanidade (European Environment Agency [EEA], 2023).

No início da década de 1960, com a Revolução Verde, foi introduzido no Brasil um modelo de produção agrícola que preconiza a mecanização do sistema, uso de cultivares melhorados geneticamente, uso de fertilizantes inorgânicos, pesticidas e herbicidas, a fim de impulsionar a produção em larga escala (Cabral *et al.*, 2022; Rezende *et al.*, 2021). Apesar de atender à alta demanda por produção de alimentos e contribuir para o combate à fome em regiões pouco desenvolvidas, essas práticas geram impactos ambientais significativos (Paumgartten, 2020). Entre eles, destacam-se a redução da matéria orgânica do solo (Azevedo *et al.*, 2024) e da biodiversidade, além da emissão de gases de efeito estufa (Kumar, 2017). Também ocorrem a contaminação do solo e da água por pesticidas e a lixiviação de nutrientes, que, junto com a erosão, podem afetar os recursos hídricos (Rashmi *et al.*, 2022). Além desses efeitos, quando há o manejo predatório, sem reposição do que se é extraído pelas colheitas, e sem o estímulo à maior sustentabilidade do sistema, afeta a fertilidade do solo, a resistência a pragas, doenças e a estresses abióticos, reduzindo, então, o rendimento das culturas (Rai *et al.*, 2020; Wise, 2021). A deterioração ambiental compromete a disponibilidade de alimentos, intensificando a insegurança alimentar, a qual pode se agravar dadas as projeções de se alcançar 9 bilhões de pessoas até o ano de 2050 (United Nations, 2024).

Devido à demanda pelo aumento da produção agrícola, o uso dos insumos químicos se intensificou (Gaboardi *et al.*, 2023), indicando dependência dos sistemas produtivos.

De acordo com a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2023), tem havido aumento nas importações de fertilizantes no Brasil. Em 2023, a importação de fertilizantes totalizou 39.439.339 toneladas, volume 14% superior ao registrado no ano de 2022. Isso reforça que, embora seja um dos maiores consumidores de fertilizantes químicos do mundo, o Brasil tem produção insuficiente, sendo dependente do mercado internacional de fertilizantes nitrogenados, fosforados e potássicos (Szychta *et al.*, 2024). Além disso, a utilização extensiva desses produtos está acompanhada de perdas por volatilização, imobilização ou outros processos geoquímicos, o que reduz a eficiência de sua aplicação. Adicionalmente, processos de produção de insumos químicos tem alta demanda de energia, muitas vezes proveniente de fontes não renováveis de combustível fóssil (Hakim *et al.*, 2021; Gabrielli *et al.*, 2023). Então, o uso dos insumos sintéticos ou provenientes de mineração promovem emissões de gases do efeito estufa - GEE sendo um agravante para as mudanças climáticas global (Bhattacharyya *et al.*, 2022). Dessa forma, devido aos impactos ao ambiente e ao próprio sistema produtivo, há a busca por tecnologias alternativas mais sustentáveis que garantam rendimentos competitivos e proteção das culturas, a fim de atingir um equilíbrio ecológico e econômico à longo prazo (Maçik *et al.*, 2020; Chakraborty & Akhtar, 2021).

No Brasil, o mercado de bioinsumos na agricultura, incluindo produtos de controle, inoculantes, bioestimulantes e solubilizadores, cresceu 15% na safra 2023/2024, com um valor comercializado de R\$ 5 bilhões. Nos últimos três anos, o setor expandiu a uma taxa média anual de 21%, impulsionado pelo interesse em práticas agrícolas de baixo impacto ambiental e por políticas públicas como o Plano Safra, que oferece crédito com juros reduzidos para produtores com práticas sustentáveis. Fatores como a profissionalização da indústria, o manejo integrado de defensivos, a crescente adoção entre produtores e o desenvolvimento de novas tecnologias continuarão a sustentar esse crescimento (Croplife Brasil, 2024).

Uma estratégia importante para o desenvolvimento integrado de práticas sustentáveis é a utilização de microrganismos benéficos visando melhorar o aproveitamento de nutrientes, reduzir doenças, pragas e o uso de produtos inorgânicos, resultando em maior produtividade das culturas (Braga *et al.*, 2025). Entre as opções encontram-se os fungos promotores de crescimento vegetal (FPCV), em especial fungos do gênero *Trichoderma*, considerado um dos mais explorados, são de vida livre e apresentam importância devido ao seu potencial de aplicação do ponto de vista agrícola, industrial e biotecnológico

(Rezende *et al.*, 2021). Sua aplicação estimula o controle de fitopatógenos transmitidos pelo solo e pode reduzir a quantidade de uso de fertilizantes sintéticos (Fu *et al.*, 2021), melhora o crescimento das raízes, estimula a associação simbiótica mutualista com fungos micorrizicos arbusculares (FMA) (Alves *et al.*, 2021; Barbosa *et al.*, 2022) e, portanto, melhora o acesso das raízes aos nutrientes (Farias *et al.*, 2018; Farias *et al.*, 2020). Nesse contexto, o presente estudo avaliou o potencial do *Trichoderma asperellum* CCT – 7830 como bioinsumo para a atividade enzimática no solo, e a disponibilização de nutrientes e promoção do crescimento do sorgo.

1.1 HIPÓTESE

A aplicação do bioinsumo *Trichoderma asperellum* CCT-7830 em solos cultivados com sorgo aumenta significativamente a atividade enzimática do solo (fosfatase ácida, β -glicosidase e arilsulfatase) e a biomassa microbiana, resultando em maior disponibilidade de nutrientes e favorecendo o crescimento da cultura em comparação com solos não tratados?

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o efeito da aplicação do inóculo com a cepa *T. asperellum* CCT – 7830 nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo, assim como no crescimento da cultura do sorgo em condições de campo.

2.2 Específicos

- ✓ Determinar a massa seca das plantas de sorgo;
- ✓ Avaliar a fertilidade do solo e o estado nutricional das plantas;
- ✓ Quantificar a produtividade de grãos do sorgo;
- ✓ Medir a respiração basal do solo (RBS);
- ✓ Estimar o Carbono da Biomassa Microbiana do solo (CBMS) e o quociente metabólico (qCO_2);
- ✓ Avaliar o potencial enzimático do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Biologia do solo: caminhos para a sustentabilidade agrícola

A biologia do solo é o eixo central que integra os processos físicos, químicos e biológicos, desempenhando papel essencial na fertilidade, nutrição de plantas e sustentabilidade agrícola. Por meio da interação dinâmica entre microrganismos, matéria orgânica e condições climáticas, o solo fornece macro e micronutrientes em formas disponíveis e proporções adequadas para o crescimento vegetal (Javed *et al.*, 2022). Esses processos são regulados pela atividade biológica, combinada à composição mineralógica do solo e a fatores climáticos, como temperatura, radiação solar e precipitação, que influenciam diretamente a pedogênese (Singh *et al.*, 2020).

Os microrganismos do solo são fundamentais para a decomposição da matéria orgânica, o ciclo de nutrientes e a biorremediação de poluentes (Hemkemeyer *et al.*, 2021). A matéria orgânica do solo (MOS) tem papel crítico ao melhorar a estabilidade estrutural, a infiltração de água e a resistência à erosão, além de fornecer nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre (Basu *et al.*, 2021). O manejo sustentável do solo, como o uso de adubos orgânicos e bioinsumos, intensifica a atividade microbiana e enzimática, aumentando a eficiência da ciclagem de nutrientes e promovendo a fertilidade em longo prazo (Fall *et al.*, 2022).

A biologia do solo também influencia a dinâmica dos nutrientes, que podem ser perdidos por erosão, lixiviação e volatilização, ou serem absorvidos pelas raízes, desempenhando seu papel na nutrição vegetal. Compreender esses processos é essencial para a gestão eficiente dos nutrientes em diferentes cenários agrícolas (Havlin & Heiniger, 2020). Dessa forma, a biologia do solo conecta a fertilidade e a nutrição vegetal, reforçando a importância de práticas que favoreçam a ciclagem natural de nutrientes.

Técnicas conservacionistas, como rotação de culturas, plantio direto e uso de bioinsumos, promovem a preservação dos recursos naturais e a resiliência dos sistemas agrícolas. Essas práticas fortalecem os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, melhoram o teor de matéria orgânica e garantem a sustentabilidade a longo prazo (Ortiz & Sansinenea, 2022; Li *et al.*, 2023). Assim, a biologia do solo é o alicerce que sustenta a fertilidade, a nutrição de plantas e o manejo sustentável, assegurando a produtividade agrícola e a saúde dos ecossistemas.

3.2 Qualidade do Solo: Atividades Enzimáticas e Indicadores Biológicos

A qualidade do solo é amplamente influenciada pela sua atividade biológica, que reflete a dinâmica da matéria orgânica, a diversidade microbiana e os processos bioquímicos em curso (Saygin *et al.*, 2023). Os indicadores biológicos do solo são amplamente utilizados para avaliar sua saúde e funcionalidade, fornecendo informações sobre a atividade microbiana, a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes (M. Tahat *et al.*, 2020).

Dentre esses indicadores, destacam-se a respiração basal do solo, o carbono da biomassa microbiana e o quociente metabólico. A respiração basal fornece uma estimativa da atividade microbiana geral, enquanto o carbono da biomassa microbiana representa a fração viva da matéria orgânica, sendo um indicativo da capacidade do solo em armazenar e reciclar nutrientes (Chen & Leffler, 2024; Bergquist *et al.*, 2025). O quociente metabólico, por sua vez, expressa a eficiência do uso do carbono pelas comunidades microbianas, auxiliando na interpretação do equilíbrio entre consumo e armazenamento de energia no solo (Ashraf *et al.*, 2022).

Além desses indicadores, as atividades enzimáticas do solo desempenham um papel essencial na decomposição da matéria orgânica e na disponibilização de nutrientes para as plantas (Sobucki *et al.*, 2021). As enzimas do solo são sintetizadas principalmente por microrganismos e raízes, e sua atividade está diretamente relacionada à fertilidade e funcionalidade do ecossistema (Barbosa *et al.*, 2023). Enzimas como a fosfatase ácida, β -glicosidase, arilsulfatase e a hidrólise de diacetato de fluoresceína são amplamente utilizadas como biomarcadores do estado nutricional e da atividade microbiana do solo (Davies *et al.*, 2022). A fosfatase ácida está envolvida na mineralização do fósforo orgânico (Veloso *et al.*, 2023), a β -glicosidase na degradação de carboidratos (Sengupta *et al.*, 2023), a arilsulfatase na disponibilização de enxofre (Yu *et al.*, 2023) e a hidrólise de diacetato de fluoresceína na avaliação da atividade microbiana total (Zhang *et al.*, 2022).

O estudo desses indicadores biológicos e enzimáticos permite uma compreensão mais detalhada do funcionamento do solo e de sua resposta a diferentes práticas de manejo, auxiliando no desenvolvimento de estratégias para a manutenção da fertilidade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas e naturais (Maurya *et al.*, 2020).

3.3 Bioinsumos

Os bioinsumos são destacados como tecnologias relevantes para reduzir o uso de agrotóxicos nos sistemas produtivos (Moreno-Espíndola *et al.*, 2024). A busca por avanços tecnológicos e uma maior inclusão de soluções biológicas na agricultura é motivada tanto pelos recursos ainda inexplorados da biodiversidade brasileira quanto pelos impactos sociais, ambientais e econômicos decorrentes do uso excessivo de agrotóxicos, que frequentemente exigem aplicações sucessivas e combinações de diferentes moléculas, elevando custos e promovendo resistência em insetos. A solução, portanto, envolve o uso de microrganismos, como fungos e bactérias no controle fitossanitário (Duque *et al.*, 2024). Para isso, é essencial regulamentar adequadamente os bioinsumos no Brasil, a fim de garantir a qualidade e segurança dos produtos. Apesar do ainda inicial marco regulatório, a criação de políticas e um espaço legal específico se torna crucial para assegurar tanto a segurança jurídica e científica quanto fomentar o uso dos bioinsumos, beneficiando não só o mercado consumidor brasileiro, mas também contribuindo para o crescimento do PIB Agro (De Miranda Santos *et al.*, 2023).

O Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020, estabelece o Programa Nacional de Bioinsumos, uma política pública voltada à ampliação do uso de insumos de base biológica na agricultura brasileira, com foco em promover práticas agrícolas mais sustentáveis e reduzir a dependência de insumos sintéticos. Essa regulamentação define bioinsumos como produtos, processos e tecnologias originários de fontes naturais, como plantas, animais e microrganismos, destinados a interferir positivamente no desenvolvimento de plantas e animais nos sistemas produtivos agrícolas e florestais. O programa é, portanto, um marco para o setor, incentivando o desenvolvimento e uso de tecnologias que impactam positivamente o crescimento vegetal e a resposta imunológica de culturas e criações, com potencial para minimizar impactos ambientais e apoiar o desenvolvimento de um modelo agrícola baseado em biotecnologia e sustentabilidade (Brasil, 2020).

Diante desse cenário, um estudo avaliou a eficácia do uso de compostos orgânicos e de agentes de biocontrole, especificamente diferentes espécies de fungos do gênero *Trichoderma* e bactérias como *Pseudomonas fluorescens*, no controle da doença do mofo branco (*Sclerotinia sclerotiorum*) em plantas de pepino, sob condições de estufa. Os resultados mostraram que o fungo *Trichoderma asperellum* foi o antagonista mais eficaz,

reduzindo significativamente o crescimento do patógeno, especialmente quando combinado com compostos orgânicos, o que reforça a eficácia de abordagens integradas no manejo de doenças. Além de inibir o crescimento patogênico, a combinação de compostos e microrganismos resultou em plantas mais saudáveis e com atividade antioxidante aumentada, indicando uma resposta de defesa robusta (Ahmed *et al.*, 2021).

De forma complementar, outro experimento demonstrou que cepas de *Trichoderma* isoladas de rizosferas na Índia, como *T. afroharzianum* e *T. asperellum*, possuem propriedades antagonistas eficazes contra patógenos de solo, como *Sclerotium rolfsii* e *Rhizoctonia solani*. Essas cepas não apenas reduziram a incidência de doenças, mas também promoveram a germinação e o crescimento das plantas. Esses resultados corroboram a viabilidade do uso de *Trichoderma* como bioinsumo, promovendo práticas agrícolas sustentáveis e aumentando a produtividade das culturas ao atuar tanto no controle fitopatogênico quanto no desenvolvimento das plantas (Jambhulkar *et al.*, 2024).

Além do controle de patógenos, outro ensaio destacou que a inoculação com o fungo micorrízico arbuscular *Entrophospora etunicata* promoveu um aumento significativo na produção de compostos bioativos nas folhas de mudas de *Capsicum chinense*. Isso sugere que a aplicação desse fungo pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade nutricional e funcional das plantas, além de potencializar o uso de micorrizas como bioestimulantes na agricultura. Ademais, a pesquisa enfatiza a importância das interações micorrízicas para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis e a produção de cultivos com propriedades benéficas à saúde (Luz *et al.*, 2023).

3.4 Cultura do sorgo

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], uma gramínea de origem tropical, possui como centro de dispersão a África e partes da Ásia (Velmurugan *et al.*, 2020). Reconhecido por sua adaptabilidade e multifuncionalidade, o sorgo se destaca pela tolerância ao estresse hídrico, ciclo curto e alto rendimento, características que têm contribuído para a expansão de sua área cultivada em diversas partes do mundo (Souza *et al.*, 2021).

Globalmente, o sorgo é o quinto cereal mais plantado, após o milho, trigo, arroz e cevada. Sua produção se concentra em regiões tropicais e semiáridas, onde se adapta às condições adversas (FAO, 2023). No Brasil, de acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) para a safra 2023/2024, o sorgo ocupa uma área de

79,82 milhões de hectares, com produção total de 298,41 milhões de toneladas e produtividade média de 3.739 kg/ha (Conab, 2024).

Essa cultura apresenta uma ampla variedade de usos, sendo cultivada em seis tipos principais: granífero, para produção de grãos; forrageiro, destinado à silagem; de corte e pastejo, utilizado como forragem direta; vassoura, para produção artesanal; sacarino, voltado à produção de etanol; e de biomassa, que pode ser empregado como fonte de energia térmica em usinas ou na formação de palhada para sistemas de plantio direto (Menezes, 2021).

3.5 *Trichoderma asperellum*

Trichoderma asperellum, pertencente ao filo *Ascomycota* (Classe *Hypocreomycetidae*, Ordem *Hypocreales*, Família *Hypocreaceae*), é um fungo amplamente distribuído no solo, especialmente na rizosfera, onde exerce um papel essencial na ciclagem de nutrientes e no controle de fitopatógenos (Cai *et al.*, 2022). Este organismo destaca-se pela rápida colonização, produção de micélio de coloração esverdeada e formação de hifas septadas com crescimento rápido e organização em anéis concêntricos (Gorai *et al.*, 2020). Além de seu papel saprofítico, *T. asperellum* tem ganhado destaque no manejo sustentável de culturas agrícolas como agente de controle biológico (ACB), devido à sua eficácia no combate a fitopatógenos, promoção do crescimento vegetal e potencial uso em biorremediação (Yang *et al.*, 2021; Sebumpan *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2021).

O *T. asperellum* atua no controle de fitopatógenos por meio de mecanismos como micoparasitismo, competição por nutrientes e espaço, além da produção de metabólitos secundários. Esses metabólitos incluem enzimas hidrolíticas (quitinolíticas e lignocelulolíticas), compostos antimicrobianos, como antibióticos e compostos voláteis, e substâncias promotoras de crescimento vegetal (Intana *et al.*, 2023; Asis *et al.*, 2021; Sood *et al.*, 2020; Mukhopadhyay & Kumar, 2020). Esses mecanismos permitem o controle eficaz de uma ampla gama de patógenos de plantas, como fungos fitopatogênicos e bactérias do solo, incluindo *Fusarium oxysporum*, (Díaz-Gutiérrez *et al.*, 2021), *Ralstonia solanacearum* (Mohamed *et al.*, 2020); *Lasiodiplodia theobromae* e *Pseudofusicoccum kimberleyense* (Rabuske *et al.*, 2023).

Além do mais, *T. asperellum* promove o crescimento vegetal ao induzir resistência sistêmica, aumentar a absorção de nutrientes e melhorar a tolerância a estresses bióticos

e abióticos. O fungo também estimula características morfológicas das plantas, como maior comprimento de raízes e brotos, formação de raízes laterais e maior número de folhas e pelos radiculares (Chin *et al.*, 2022; Zin & Badaluddin, 2020; Saldana-Mendoza *et al.*, 2023).

O uso de *T. asperellum* na agricultura inclui sua aplicação como biofertilizante e agente de manejo integrado de pragas, contribuindo para a redução do uso de insumos químicos e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Poveda, 2021). Estudos recentes destacam sua eficácia em diversas culturas agrícolas, incluindo arroz (Prismantoro *et al.*, 2024), tomate (Singh *et al.*, 2024), pepino (Wang *et al.*, 2023), milho (Karuppiah *et al.*, 2022) e trigo (Illescas *et al.*, 2022), onde demonstra não apenas supressão de doenças, mas também aumento da produtividade (Rivera-Mendez *et al.*, 2020).

Adicionalmente, *T. asperellum* apresenta potencial em biorremediação, devido à sua capacidade de absorver metais pesados, como cobre, e de produzir enzimas termoestáveis com diversas bioatividades (Maldaner *et al.*, 2021; Saravanakumar *et al.*, 2020).

Estudos recentes também apontam o potencial entomopatogênico de *T. asperellum* no controle de pragas agrícolas e vetores de doenças humanas. Resultados experimentais indicam alta eficácia contra larvas de *Zophobas morio* e mosquitos vetores de malária (*Anopheles spp.*) e dengue (*Aedes aegypti*), com taxas de mortalidade superiores a 85% (Da Silveira *et al.*, 2021). Esse potencial amplia o espectro de aplicação do fungo para além da agricultura, destacando sua relevância para a saúde pública.

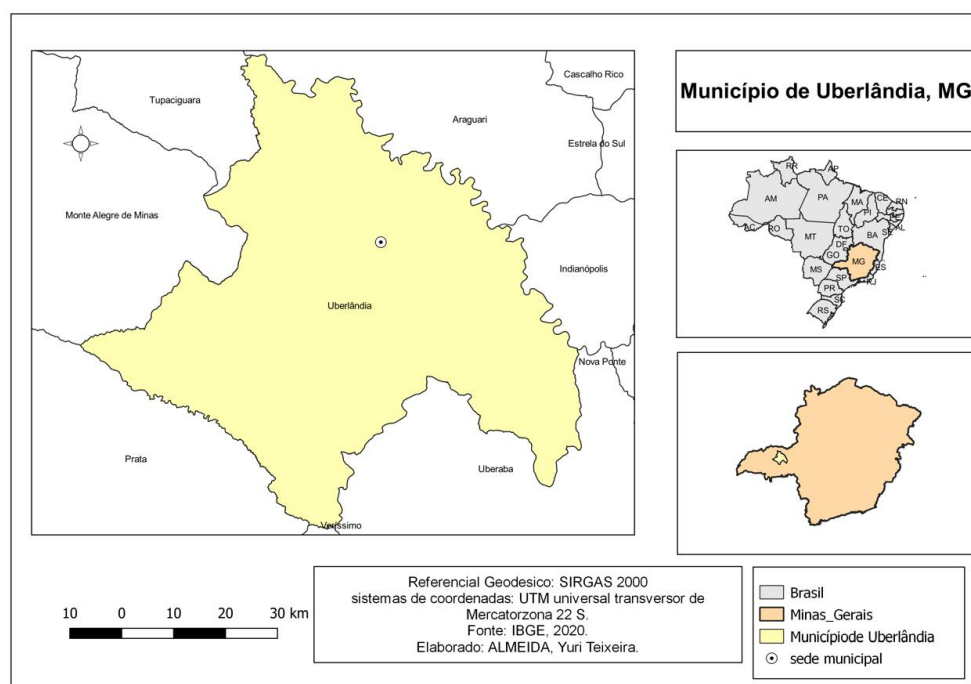
O *Trichoderma asperellum* representa uma solução promissora e multifuncional para os desafios do manejo sustentável e das biotecnologias. Sua atuação como agente de controle biológico, biofertilizante e ferramenta de biorremediação reforça sua importância para a agricultura sustentável. Além disso, sua aplicabilidade no controle de vetores de doenças humanas demonstra sua versatilidade biotecnológica. O avanço nas pesquisas sobre *T. asperellum* pode abrir novos horizontes para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e ecologicamente responsáveis.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4 Localização do experimento em campo

O experimento foi conduzido na cidade de Uberlândia, no estado de Minas Gerais, conforme a Figura 1:

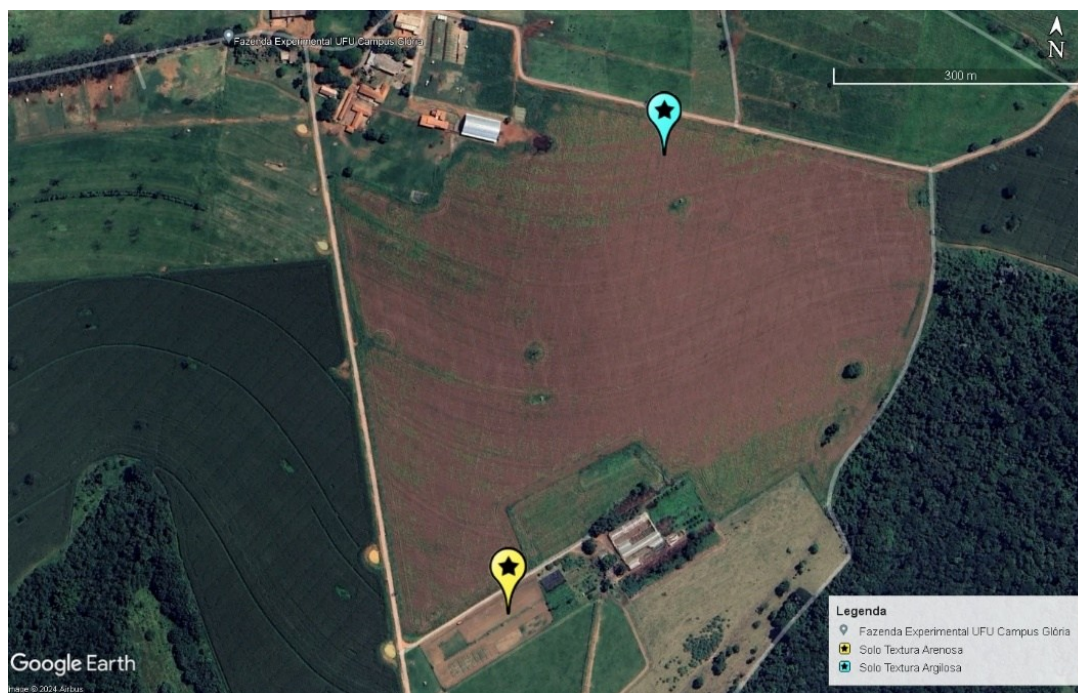
Figura 1. Mapa de localização da cidade de Uberlândia (MG), onde foi realizado o experimento.



Fonte: Almeida (2025), com base no IBGE (2020)

O ensaio foi realizado, em campo, na Fazenda experimental do campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia, em duas áreas, com distintas texturas de solo, são elas, área 1 ($18^{\circ}57'13.85''\text{S}$ e $48^{\circ}12'38.74''\text{O}$), cujo solo é Latossolo Vermelho Distrófico, típico de textura média (66% areia/ 8% silte/ 26% argila); e área 2 ($18^{\circ}56'56.62''\text{S}$ e $48^{\circ}12'33.74''\text{O}$), seguindo a mesma categoria de solo, porém com textura argilosa (41% areia/ 14% silte/ 45% argila), como pode ser observado na Figura 2.

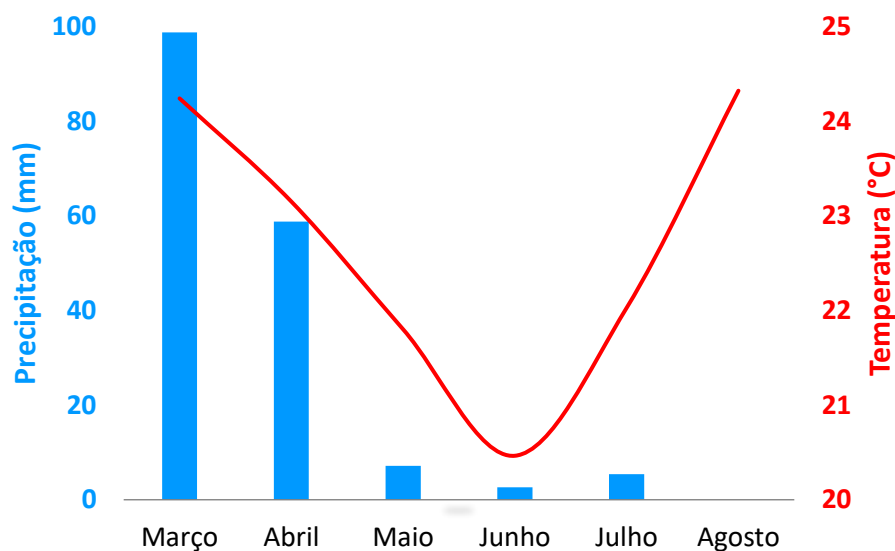
Figura 2. Localização das áreas de instalação do experimento: Área 1 (em amarelo) com solo de textura média, nas coordenadas (18°57'13.85"S e 48°12'38.74"O); e a Área 2 (em azul) com solo argiloso nas coordenadas (18°56'56.62"S e 48°12'33.74"O).



Fonte: Imagem extraída do software Google Earth® em 12/06/2024

A cidade de Uberlândia possui clima classificado como Aw – clima tropical de savana, conforme a classificação de Köppen. Esse clima é definido por períodos distintos de secas e chuvas, com inverno seco e verão chuvoso. Durante o experimento, realizado entre os meses de março e agosto de 2023, foi registrado um acumulado de precipitação de 172,8 mm, refletindo o padrão de estação seca predominante nesse período e a temperatura média foi de 22,4°C, em concordância com as condições climáticas da região, onde as temperaturas nos meses de inverno costumam atingir médias próximas de 18°C (Althoff *et al.*, 2023). A Figura 3 ilustra o volume de precipitação e a temperatura média registrados durante a instalação e operação do ensaio.

Figura 3. Volume de precipitação e temperatura média registrados nos meses de instalação e operação do ensaio, com dados da estação automática do INMET em Uberlândia (507).



Fonte: Dados extraídos do portal Instituto Nacional de Meteorologia - INMET em 08/01/2025

4.5 Preparo do solo

O experimento foi conduzido em solo coberto por palhada de soja, remanescente da safra anterior. O sulcamento foi realizado no solo de textura média, no dia 7 de março de 2023, utilizando as hastes, espaçadas a 0,5 m, do trator escarificador. A semeadura nessa área ocorreu em 9 de março de 2023. No solo argiloso, o sulcamento foi conduzido em 9 de março de 2023, seguindo o mesmo procedimento adotado no solo de textura média, e a semeadura foi realizada em 13 de março de 2023. Após o sulcamento, foram coletadas amostras compostas de solo na camada de 0 a 20 cm de profundidade para a determinação da fertilidade inicial dos solos em ambas as áreas.

A Tabela 1 apresenta os resultados resumidos da análise de fertilidade inicial do solo nas duas áreas avaliadas.

Tabela 1. Resultados da análise de fertilidade inicial do solo coletado nas áreas 1 (solo de textura média) e 2 (solo argiloso), destinadas ao cultivo de sorgo. Uberlândia, março de 2023.

pH	MO	Corg	P*	Ca	Mg	K	Al	H+Al	CTC
----	----	------	----	----	----	---	----	------	-----

	dag kg ⁻¹			mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³					
LV-MED	5,6	2,7	1,82	60,3	2,34	0,83	0,55	0	2,52	6,24
LV-ARG	5,7	1,6	1,08	36,4	2,61	1,36	0,34	0	2,42	6,73

LV-MED: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura média; LV-ARG: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa. *Extrator Mehlich.

Fonte: Autoral

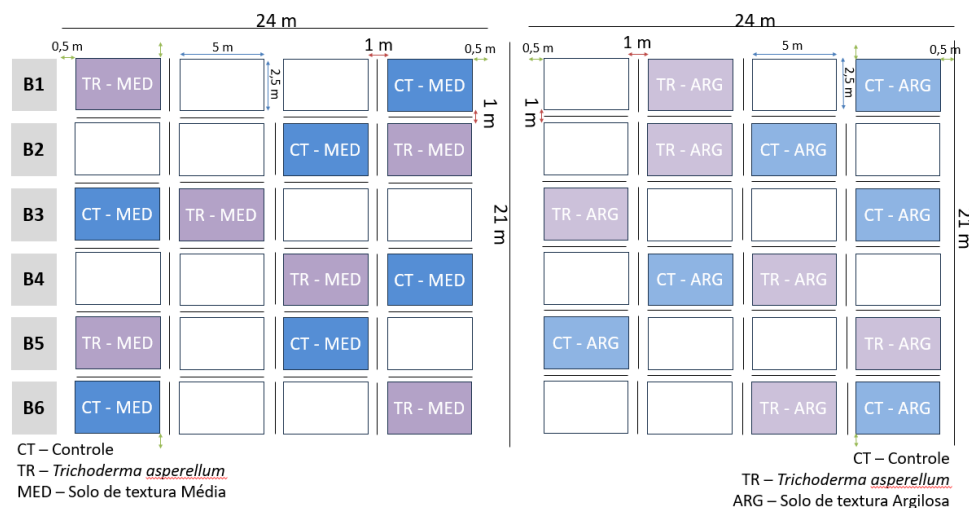
Em seguida, foi realizada a adubação nos sulcos de plantio em ambas as áreas, utilizando Superfosfato Simples (SS), na dosagem de 10g por metro linear, de acordo com as exigências da cultura.

4.6 Delineamento experimental

O ensaio foi conduzido seguindo o Delineamento em Blocos Casualizado (DBC) em ambas as áreas, cada uma com 504 m² (24 m de comprimento por 21 m de largura). O experimento foi organizado em seis blocos e quatro tratamentos, totalizando 24 parcelas em cada área. Cada parcela foi composta por cinco linhas de plantio, com 5 m de comprimento espaçadas em 0,5 m, resultando em uma área total de 12,5 m². Além disso, para minimizar a influência entre as parcelas experimentais, cada uma contava com uma área de bordadura de 0,5 m. Como área útil, foi considerado as três linhas centrais, eliminando-se 1 m na frente e 1 m no fundo, totalizando 4,5 m².

A Figura 4 ilustra o delineamento do experimento e indica a distribuição das unidades experimentais. É importante destacar que, embora o ensaio tenha incluído outros tratamentos de pesquisa, o croqui apresenta exclusivamente os abordados neste estudo.

Figura 4. Delineamento esquemático de tratamentos e parcelas experimentais nas áreas 1 (à esquerda) – solo de textura média e 2 (à direita) – solo de textura argilosa.



Fonte: Autoral

4.4 Preparo e aplicação da suspensão com *Trichoderma asperellum*

O isolado com o fungo *T. asperellum* foi cedido pela empresa Biosag (HTM Comércio e Laboratórios de Corretivos do Solo Ltda.), sob a forma de inóculo comercial em frascos contendo o meio de cultura com o isolado. Em laboratório, os frascos foram pesados antes e depois da retirada do produto, para verificar a massa do meio de cultura com o isolado. O conteúdo do produto, juntamente com o meio de cultura, foi transferido para um liquidificador com 500 mL de água destilada e homogeneizado por um pulso de três segundos, produzindo a suspensão inicial (SI). Após, foi realizada diluição em série e inóculo em meio BDA em placas de petri para contagem de UFC.

Os frascos apresentaram em média $2,01 \times 10^6$ UFC. Para o preparo da suspensão final visando a aplicação do tratamento, uma alíquota de 100 mL da SI foi diluída em 400 mL de água destilada. Em seguida, 25 mL dessa suspensão foram transferidos para 10 L de água destilada, formando o volume de calda utilizado para aplicação nos sulcos de plantio.

A primeira suspensão foi aplicada nos sulcos de plantio por meio de uma bomba costal com capacidade de 20 L e bico em formato de leque. A vazão da bomba era de 8,33 mL/s e, para cada parcela experimental com cinco linhas de plantio, foram destinados 250 mL por linha (50 mL/m) em 30 segundos no sulco por duas vezes: antes e após a semeadura. Cada aplicação equivale a diluição do conteúdo do frasco do produto em 500 mL e, em seguida, em 1000L para aplicação em um hectare, conforme recomendação da empresa detentora do isolado.

4.5 Semeadura

Foram semeadas 11 sementes por metro linear de sorgo híbrido precoce Pioneer 50A60, com profundidade de 3 cm, totalizando 55 sementes por linha em cada parcela experimental. Inicialmente, abriu-se os sulcos em todas as parcelas experimentais, onde foi realizada a primeira aplicação do produto (conforme item 4.4). Em seguida, as sementes foram posicionadas nos sulcos e a segunda aplicação do produto foi realizada diretamente sobre as sementes. Posteriormente, os sulcos foram recobertos com solo.

4.6 Acompanhamento do experimento

No solo de textura média, as primeiras plântulas de sorgo emergiram no dia 16 de março, enquanto no solo argiloso, a emergência ocorreu em 20 de março. Durante esse período, foi realizado o desbaste manual de plantas daninhas e o controle de formigas cortadeiras. No dia 30 de março, foi aplicada a atrazina como herbicida. Nessa ocasião, as plantas de sorgo apresentavam, em média, 50 cm de altura no solo de textura média e 30 cm no solo argiloso.

Em 6 de abril, foi detectada a presença da lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*). Como medida de controle, fungicidas e inseticidas foram aplicados na semana seguinte em ambas as áreas. No dia 11 de abril, realizou-se a adubação com NPK (30-00-20) na dose de 200 kg/ha, por meio de arraste. No dia 20 de abril, as plantas de sorgo estavam no estágio de aparecimento das folhas-bandeira. Em 1º de maio, as folhas apresentavam o estágio completamente emborrachado, enquanto as primeiras panículas surgiram nos dias 6 e 9 de maio nas áreas 1 (solo de textura média) e 2 (solo argiloso), respectivamente.

4.7 Parâmetros avaliados

4.7.1 Fertilidade do solo, nutrição do sorgo e massa seca da parte aérea

A coleta de amostras foi realizada no estágio fenológico de floração do sorgo, quando todas as plantas apresentavam pendões completamente expostos. As coletas ocorreram nos dias 22 de maio no ensaio sobre solo textura média e 5 de junho de 2023 no ensaio sobre solo argiloso. Em cada parcela experimental, selecionaram-se duas plantas posicionadas na sexta posição das extremidades da linha central. Para a coleta de solo, utilizaram-se ferramentas específicas para remover um bloco de 0 a 10 cm de profundidade contendo as raízes principais, considerado o solo rizosférico. As amostras de solos e raízes foram acondicionadas em sacos plásticos, enquanto a parte aérea das plantas foram armazenadas em sacos de papel.

As partes aéreas foram encaminhadas para avaliação da massa seca e definição dos teores de nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), Cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), boro (B), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn), determinados seguindo os protocolos descritos por Silva (2009). Os solos foram separados das raízes e peneirados em malha de 2 mm e, em seguida, submetidos à

determinação de MO (matéria-orgânica), pH, Ca, Mg, K, Al (alumínio), H+Al (acidez potencial), B, Fe, Cu, Mn, Zn e P, conforme o método de Teixeira *et al.* (2017).

4.7.2 Produtividade

A colheita das panículas foi realizada nos dias 10 e 11 de agosto de 2023, utilizando as três linhas centrais de cada parcela. Para garantir a uniformidade, foram excluídos 2 metros das extremidades, resultando em uma área útil de 1,5 m² por parcela. Após a colheita, realizou-se a debulha manual das panículas para aferir o peso dos grãos e a umidade. O rendimento em grãos, expressos em kg/ha, foi calculado com base nos valores ajustados para um teor de umidade padrão de 13%, utilizando a Equação 1:

$$Pf = \frac{Pi \cdot (100 - Up)}{87} \text{ Equação (1)}$$

Onde:

- Pf: peso final da parcela (g);
- Pi: peso inicial da parcela (g);
- Up: umidade da parcela (%).

4.7.3 Respiração Basal do Solo (RBS)

A determinação da RBS foi conduzida segundo o método de Jenkinson e Powlson (1976). Amostras de solo previamente peneiradas foram acondicionadas em frascos de vidro com capacidade de 823 mL, sendo umedecidas até 60% da capacidade de retenção para simular condições favoráveis à atividade microbiana. Em cada frasco, foi inserido um copo contendo 10 mL de NaOH (1M) para capturar o CO₂ liberado durante a respiração microbiana. Os frascos foram vedados hermeticamente para evitar interferências externas, e um frasco controle contendo apenas NaOH foi incluído como referência.

As amostras foram incubadas em ambiente escuro por 21 dias, com medições do CO₂ liberado nos dias 1, 3, 7, 14 e 21 (período que não havia mais respiração). O dióxido de carbono capturado foi precipitado por meio de uma reação com cloreto de bário, BaCl₂ 10% (m/v), seguida de titulação com ácido clorídrico, HCl 0,5M, na presença de fenolftaleína 1% (m/v) como indicador.

O cálculo da RBS foi realizado utilizando a Equação 2:

$$RBS \left(\frac{mg \text{ de } C - CO_2}{\frac{Kg \text{ de solo}}{hora}} \right) = \left(\frac{((Vb - Va) \cdot M \cdot 6 \cdot 1000)}{\frac{Ps}{t}} \right) \text{ Equação (2)}$$

Onde:

- Vb: volume de HCl consumido na titulação da solução controle (branco) (mL);
- Va: volume de HCl consumido na titulação da amostra (mL);
- M: molaridade do HCl (0,5 M);
- 6: constante estequiométrica para a conversão de carbonatos a CO₂;
- Ps: massa de solo seco (g);
- t: tempo de incubação da amostra (horas).

4.7.4 Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (CBMS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)

Determinou-se o Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (CBMS) segundo a metodologia de fumigação/extração descrita por Vance *et al.* (1987), com adaptações das técnicas apresentadas por Brookes *et al.* (1982) e Witt *et al.* (2000). As amostras foram acondicionadas em ambiente sem exposição à luz por um período de 24 horas, sendo posteriormente submetidas ao método de quantificação de carbono de Walkley e Black (1934), modificado por Tedesco *et al.* (1995). Para os cálculos, adotou-se o fator de correção kC=0,33 preconizado por Sparling e West (1988).

Para quantificar o carbono nos extratos, foi necessária a padronização da solução de sulfato ferroso amoniacal, conforme a Equação 3:

$$M1 = \frac{[(M2 \cdot V2) \cdot 6]}{V1} \text{ Equação (3)}$$

Onde:

- M1 = Molaridade exata padronizada do sulfato ferroso amoniacal;
- M2 = Molaridade exata do dicromato de potássio (0,066 M);
- 6 = Razão estequiométrica do K₂Cr₂O₇;

- V1 = Volume de sulfato ferroso amoniacal utilizado na titulação do controle (branco);
- V2 = Volume de dicromato de potássio utilizado na titulação.

A quantificação do carbono nos extratos foi realizada por meio da Equação 4:

$$C \left(\frac{mg\ C}{Kg\ solo} \right) = \frac{(Vb - Va) \cdot M1 \cdot 0,003 \cdot V_1 \cdot 10^6}{Ps \cdot V_2} \text{ Equação (4)}$$

Onde:

- C = Carbono extraído do solo;
- Vb = Volume de sulfato ferroso amoniacal utilizado na titulação da solução controle (branco) (mL);
- Va = Volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra (mL);
- M1 = Molaridade exata do sulfato ferroso amoniacal;
- V1 = Volume do extrator (K₂SO₄) utilizado;
- V2 = Volume da alíquota pipetada do extrato para titulação;
- 0,003 = Miliequivalente de carbono;
- Ps = Massa de solo seco (g).

Com os valores obtidos, o CBM-S foi determinado conforme a Equação 5, utilizando o fator de correção $kC = 0,33$ de Sparling e West (1988):

$$CBMS \left(\frac{mg\ C\ microbiano}{Kg\ de\ solo} \right) = \frac{FC}{kc} \text{ Equação (5)}$$

Onde:

- CBMS = Carbono da Biomassa Microbiana do solo, expresso em mg C por kg de solo;
- FC = Fluxo obtido pela diferença entre a quantidade de carbono extraído das amostras fumigadas e não fumigadas;
- kc = Fator de correção.

Com base na determinação do CBMS, calculou-se o quociente metabólico do solo (qCO₂), que reflete a relação entre a Respiração Basal do Solo (RBS) e o CBMS, conforme a fórmula proposta por Anderson e Domsch (1993) (Equação 6):

$$qCO_2 \left(\frac{mgC - CO_2}{g \cdot CBM - S \cdot h} \right) = \frac{RBS \left(\frac{mgC - CO_2}{Kg \text{ solo} \cdot h} \right)}{\frac{CBMS \left(\frac{mgC}{Kg \text{ solo}} \right)}{10^3}} \text{ Equação (6)}$$

Onde:

- qCO_2 = Quociente metabólico do solo;
- RBS = Respiração Basal do Solo;
- CBMS = Carbono da Biomassa Microbiana do Solo.

4.7.5 Potencial enzimático do solo

Para a análise do potencial enzimático do solo, foram avaliadas atividades de enzimas-chave para os ciclos biogeoquímicos, incluindo a hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA), realizada segundo o método de Adam e Duncan (2001), e as atividades das enzimas fosfatase ácida, β -glicosidase e arilsulfatase, determinadas conforme a metodologia descrita por Tabatabai (1994).

• Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA)

Nesta análise, foram utilizados 2 g de solo de cada amostra, acondicionados em tubos Falcon com capacidade de 50 mL, aos quais foram adicionados 15 mL de tampão de fosfato de potássio a 60 mM (pH 7,6). Em seguida, adicionou-se uma alíquota de 0,2 mL da solução estoque, correspondente a 1000 μ g de FDA por mL. Amostras controle (brancos) foram preparadas sem a adição de FDA. Após o fechamento dos frascos, as amostras foram homogeneizadas manualmente e, posteriormente, colocadas em uma incubadora orbital a 30 °C por 20 minutos.

Após o período de incubação, sob uma capela de exaustão, foram adicionados 15 mL de uma solução de clorofórmio/metanol na proporção de 2:1 em cada tubo. Os tubos foram então fechados, homogeneizados cuidadosamente e submetidos à centrifugação a 3.000 rpm durante três minutos. Em seguida, filtraram-se os sobrenadantes, e os filtrados resultantes foram analisados por espectrofotometria a 490 nm, com base em uma curva de calibração construída com padrões entre 0 e 5 μ g de fluoresceína por mililitro.

A determinação das atividades enzimáticas de fosfatase, arilsulfatase e β -glicosidase foram realizadas utilizando métodos baseados na estimativa colorimétrica do p-nitrofenol liberado durante as reações enzimáticas.

- **Fosfatase ácida**

Para a análise da fosfatase, 1 g de solo peneirado foi transferido para frascos de Erlenmeyer com capacidade de 50 mL. A cada amostra, adicionaram-se 0,25 mL de tolueno, 4 mL de tampão universal modificado (Modified Universal Buffer – MUB) com pH 6,5 e 1 mL de solução de p-nitrofenil fosfato (PNP). Os frascos foram cuidadosamente agitados, tampados e incubados a 37 °C por uma hora. Após o período de incubação, adicionaram-se 1 mL de CaCl₂ (0,5 M) e 4 mL de NaOH (0,5 M), seguidos de homogeneização. As amostras foram centrifugadas em tubos de Eppendorf a 10.000 rpm por cinco minutos. Posteriormente, alíquotas dos sobrenadantes foram retiradas para avaliação da cor amarela gerada no espectrofotômetro, utilizando um comprimento de onda de 410 nm. A concentração final do p-nitrofenil liberado foi determinada a partir de um gráfico de calibração com padrões de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 µg de p-nitrofenol.

- **Arilsulfatase**

O procedimento para arilsulfatase foi similar ao da fosfatase, com a diferença do tampão utilizado. Neste caso, 1 g de solo peneirado foi incubado com uma solução tamponada de pH 5,8 composta por p-nitrofenil sulfato de potássio e tolueno. As amostras receberam 0,25 mL de tolueno, 4 mL de tampão de acetato e 1 mL de solução de p-nitrofenil de sulfato (PNS), sendo em seguida homogeneizadas, tampadas e incubadas a 37 °C por uma hora. Após a incubação, adicionaram-se 1 mL de CaCl₂ (0,5 M) e 4 mL de NaOH (0,5 M). Os sobrenadantes foram centrifugados e analisados no espectrofotômetro a 410 nm, com a concentração de p-nitrofenil de sulfato sendo calculada a partir de um gráfico de calibração com padrões de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 µg de p-nitrofenil de sulfato.

- **β-glicosidase**

Para a β-glicosidase, 1 g de solo peneirado foi misturado em frascos de Erlenmeyer com 0,25 mL de tolueno, 4 mL de MUB (pH 6,0) e 1 mL de solução de p-nitrofenil-β-D-glicosidase (PNG). Após homogeneização, os frascos foram tampados e incubados a 37 °C por uma hora. Na etapa seguinte, adicionaram-se 1 mL de CaCl₂ (0,5 M) e 4 mL de tampão tris(hidroximetil)aminometano (THAM). Após centrifugação a 10.000 rpm por cinco minutos, os sobrenadantes foram analisados no espectrofotômetro a um comprimento de onda de 410 nm. A concentração de p-nitrofenol liberado foi calculada utilizando um gráfico de calibração com padrões de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 µg de PNG.

4.8 Estatística

Os dados foram analisados utilizando o método em esquema fatorial (2x2), considerando o primeiro fator como a categoria do solo (textura média/arenosa x textura argilosa), e o segundo como tratamento aplicado (controle x *T. asperellum*), em concordância à linguagem de programação RStudio®. Para as análises estatísticas, diferentes testes foram empregados de acordo com as características das variáveis, divididas entre paramétricas e não paramétricas.

Para as variáveis paramétricas, foram aplicados testes preliminares para verificar os pressupostos necessários à análise estatística. Entre eles, destacaram-se o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade dos resíduos, o teste de O'Neill Mathews para verificar a homogeneidade de variâncias e o teste de aditividade de Tukey para avaliar a aditividade de blocos. Após a validação desses critérios, foi conduzida a Análise de Variância (ANOVA), complementada pelo teste de médias de Scott-Knott, ambos adotando um nível de significância de 5%.

Para as variáveis não paramétricas, a análise foi conduzida utilizando o teste de Kruskal-Wallis, apropriado para variáveis independentes, também com um nível de significância de 5%. Essas metodologias garantiram a robustez e a adequação estatística na interpretação dos dados experimentais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Massa seca da parte aérea da cultura do sorgo

A análise do esquema fatorial revelou que a interação entre solo e tratamento não foi significativa ($p > 0,05$; teste F) e a aplicação do isolado de *Trichoderma asperellum* não influenciou significativamente a massa seca da parte aérea do sorgo (Tabela 2).

Tabela 2. Massa seca da parte aérea da cultura do sorgo coletada nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.

Parâmetro	Tratamento	Solo	
		MED	ARG
Massa Seca	CT	99,34 ± 12,67	117,08 ± 19,11
	TR	111,51 ± 32,75	131,37 ± 41,9

Médias $\pm$ (desvio padrão) ($n = 6$). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o teste de Scott-Knott a 5% de significância. CT: Tratamento controle sem aplicação de microrganismo; TR: Tratamento com aplicação de *Trichoderma asperellum*; MED: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura média; ARG: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa.

Fonte: Autoral

Embora no presente estudo não tenham sido verificadas diferenças significativas, outros trabalhos corroboram a ausência de efeitos consistentes em algumas culturas. Em plantas de soja, crescendo em casa de vegetação, não houve diferenças significativas entre aplicação de *Trichoderma asperellum* e controle em relação à massa seca e massa fresca das raízes e da parte aérea (Braga *et al.*, 2025).

Por outro lado, há evidências consistentes de que o *T. asperellum* pode atuar como promotor do crescimento vegetal em condições específicas. Foram relatados benefícios no feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), incluindo aumento na massa seca das raízes, maior colonização micorrízica arbuscular, elevação nos teores de Cu e B acumulados na parte aérea e incremento no carbono orgânico do solo da rizosfera (Alves *et al.*, 2021). Similarmente, a eficiência do fungo no crescimento da cultura da soja em solos de cerrado foi relatada (Chagas *et al.*, 2017).

Esses resultados indicam que os efeitos do *T. asperellum* podem variar conforme a cultura, as condições edafoclimáticas e os parâmetros avaliados, reforçando a necessidade de estudos adicionais para compreender melhor as condições em que o fungo pode expressar seu potencial no crescimento vegetal.

5.2 Produtividade

A análise do esquema fatorial revelou que a interação entre solo e tratamento não foi significativa, e a aplicação do isolado de *Trichoderma asperellum* não resultou em alterações relevantes na produtividade do sorgo (Tabela 3). Esses resultados indicam que, dentro das condições avaliadas no experimento, o tratamento não exerceu impacto expressivo sobre a cultura. A ausência de diferenças pode estar relacionada às características adaptativas do sorgo, como o metabolismo C4, um sistema radicular profundo, regulação estomática eficiente, área foliar reduzida e camada cerosa nas folhas contribuem para sua resiliência, minimizando os efeitos de intervenções externas sobre

sua produtividade (Menezes, 2021). Dessa forma, os resultados sugerem que as condições do experimento não foram limitantes o suficiente para que o tratamento promovesse efeitos perceptíveis sobre a cultura.

Tabela 3. Produtividade da cultura do sorgo coletada nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.

Parâmetro	Tratamento	Solo	
		MED	ARG
Produtividade	CT	5246,22 ± 906,54	4590,64 ± 608,64
	TR	5006,69 ± 749,29	5100,4 ± 918,51

Médias ± (desvio padrão) (n = 6). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o teste de Scott-Knott a 5% de significância. CT: Tratamento controle sem aplicação de microrganismo; TR: Tratamento com aplicação de *Trichoderma asperellum*; MED: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura média; ARG: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa.

Fonte: Autoral

5.3 Fertilidade do solo

A aplicação do tratamento com *Trichoderma asperellum* resultou em maior acidez potencial em relação ao controle ($p < 0,05$) em solo de textura média (Tabela 4). A decomposição da matéria orgânica e a produção de ácidos orgânicos pelo *T. asperellum* podem elevar a H+Al (Al-Askar *et al.*, 2021; Fu *et al.*, 2021).

Tabela 4. Parâmetros analisados da fertilidade do solo coletado nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.

Parâmetros	Tratamento	Solo			
		MED		ARG	
pH (H ₂ O) *	CT	6,12 ± 0,25	Ba	6,33 ± 0,27	Aa
	TR	5,88 ± 0,25	Ba	6,35 ± 0,24	Aa
pH (CaCl ₂) *	CT	5,65 ± 0,23	Ba	5,82 ± 0,21	Aa
	TR	5,45 ± 0,22	Ba	5,85 ± 0,2	Aa
P me ⁻¹ (mg dm ⁻³) **	CT	67,17 ± 17,27	Aa	69,4 ± 22,47	Aa
	TR	65,33 ± 18,96	Aa	49,47 ± 19,08	Aa
S (mg dm ⁻³) *	CT	9,32 ± 2,08	Ba	11,4 ± 3,35	Aa

	TR	9,95 ± 2,42	Ba	12,78 ± 3,99	Aa
B (mg dm⁻³) *	CT	0,33 ± 0,05	Aa	0,34 ± 0,05	Aa
	TR	0,31 ± 0,07	Aa	0,35 ± 0,05	Aa
Cu (mg dm⁻³) *	CT	0,99 ± 0,12	Aa	0,83 ± 0,08	Ba
	TR	1,04 ± 0,11	Aa	0,78 ± 0,1	Ba
Fe (mg dm⁻³) *	CT	61 ± 14,63	Aa	29,33 ± 2,94	Ba
	TR	66 ± 16,24	Aa	29,83 ± 6,68	Ba
Mn (mg dm⁻³) *	CT	5,39 ± 0,52	Aa	1,79 ± 0,27	Ba
	TR	5,18 ± 0,42	Aa	1,65 ± 0,21	Ba
Zn (mg dm⁻³) **	CT	3,36 ± 0,46	Aa	3,07 ± 0,70	Aa
	TR	3,34 ± 0,86	Aa	3,04 ± 0,85	Aa
K (cmolc dm⁻³) **	CT	0,42 ± 0,04	Aa	0,36 ± 0,09	Aa
	TR	0,33 ± 0,09	Aa	0,38 ± 0,06	Aa
Ca (cmolc dm⁻³) *	CT	3,06 ± 0,23	Ba	3,56 ± 0,40	Aa
	TR	3,16 ± 0,52	Ba	3,48 ± 0,37	Aa
Mg (cmolc dm⁻³) **	CT	1 ± 0,08	Ba	1,65 ± 0,39	Aa
	TR	1,07 ± 0,12	Ba	1,46 ± 0,21	Aa
H+Al (cmolc dm⁻³) *	CT	2,04 ± 0,29	Bb	1,78 ± 0,29	Bb
	TR	2,38 ± 0,35	Aa	1,65 ± 0,21	Bb
SB (cmolc dm⁻³) *	CT	4,48 ± 0,34	Ba	5,57 ± 0,73	Aa
	TR	4,56 ± 0,63	Ba	5,32 ± 0,49	Aa
T (cmolc dm⁻³) *	CT	6,51 ± 0,31	Aa	7,35 ± 0,73	Aa
	TR	6,94 ± 0,69	Aa	6,97 ± 0,47	Aa
V (%) *	CT	68,83 ± 4,36	Ba	75,67 ± 4,13	Aa
	TR	65,67 ± 5,09	Ba	76 ± 0,47	Aa
MO (dag kg⁻¹) *	CT	2,67 ± 0,12	Aa	1,72 ± 0,17	Ba
	TR	2,67 ± 0,33	Aa	1,77 ± 0,14	Ba

* Médias ± (desvio padrão) (n = 6), dados paramétricos sendo realizado teste de Scott-Knott. ** Mediana ± (amplitude interquartil) (n = 6), dados não paramétricos sendo realizado teste de Kruskal Wallis. Ambos os testes com nível de significância de 5% (p < 0,05), onde são seguidas por letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha. Destaques em negrito indicam as maiores concentrações observadas para os parâmetros avaliados. CT: Tratamento controle sem aplicação de microrganismo; TR: Tratamento com aplicação de *Trichoderma asperellum*; MED: Latossolo Vermelho Distrófico típico

de textura média; ARG: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa; P: Fósforo; S: Enxofre; B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; SB: Soma de bases; T=CTC: Capacidade de troca catiônica; V (%): Saturação por bases; MO: Matéria-Orgânica.

Fonte: Autoral

Os teores de S, Ca e Mg foram superiores nos solos argilosos, enquanto os de Cu, Fe e Mn foram mais elevados nos solos de textura média (Tabela 4). Essas variações refletem as características intrínsecas e o manejo aplicado a cada solo avaliado. Solos argilosos tendem a apresentar maior capacidade de troca catiônica, maior matéria orgânica e maior superfície específica, fatores que favorecem a retenção de alguns nutrientes (Ding *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2023; Rätty *et al.*, 2021). Já os solos de textura média podem apresentar maior mobilidade de certos elementos, resultando em teores diferenciados. Além disso, a aplicação prévia de esterco e calcário no cultivo de inhame (*Dioscorea spp.*) em 2022 pode ter influenciado as concentrações observadas para essa classe de solo.

Os teores de MO não diferiram entre os tratamentos, mas foram superiores nos solos de textura média (Tabela 4).

Por fim, para os demais parâmetros analisados, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos.

5.4 Nutrição do sorgo

Os teores de S, Ca e B foram superiores no solo argiloso, enquanto o de Mn foi superior em solo de textura média (Tabela 5). Refletindo as características específicas das texturas avaliadas. Solos argilosos, possuem maior capacidade de retenção de água, CTC e quantidade de microporos o que tornam esses solos mais eficazes no armazenamento de nutrientes em comparação aos de textura média ou arenosa (De Oliveira Silva *et al.*, 2020).

Tabela 5. Parâmetros analisados da nutrição do sorgo coletado nas áreas de solo de textura média e solo argiloso.

Parâmetros	Tratamento	Solo			
		MED		ARG	
N (g kg ⁻¹) *	CT	19,98 ± 4,05	Aa	24,53 ± 2,46	Aa

	TR	21,87 ± 5,45	Aa	23,37 ± 2,71	Aa
	CT	1,52 ± 0,38	Aa	1,38 ± 0,16	Aa
P (g kg⁻¹) *	TR	1,63 ± 0,6	Aa	1,7 ± 0,36	Aa
	CT	19,17 ± 1,33	Aa	17,33 ± 1,63	Aa
K (g kg⁻¹) *	TR	17,83 ± 4,36	Aa	18,33 ± 2,66	Aa
	CT	1 ± 0,2	Ba	2,3 ± 0,32	Aa
S (g kg⁻¹) *	TR	1,08 ± 0,27	Ba	2,32 ± 0,39	Aa
	CT	6,46 ± 0,25	Ba	7,32 ± 0,58	Aa
Ca (g kg⁻¹) *	TR	6,39 ± 0,69	Ba	7,36 ± 0,8	Aa
	CT	3,69 ± 0,3	Aa	3,76 ± 0,35	Aa
Mg (g kg⁻¹) **	TR	3,47 ± 0,5	Aa	3,87 ± 0,66	Aa
	CT	5,57 ± 1,09	Aa	5,35 ± 1,57	Aa
Cu (mg kg⁻¹) *	TR	5,08 ± 0,89	Aa	6,68 ± 0,75	Aa
	CT	257,5 ± 58,17	Aa	283,5 ± 72,94	Aa
Fe (mg kg⁻¹) *	TR	237 ± 54,11	Aa	275,83 ± 28,66	Aa
	CT	40,5 ± 7,06	Aa	17,5 ± 3,39	Ba
Mn (mg kg⁻¹) *	TR	38,17 ± 6,11	Aa	18,33 ± 2,16	Ba
	CT	42,43 ± 12,42	Aa	39,88 ± 9,22	Aa
Zn (mg kg⁻¹) *	TR	42,67 ± 13,28	Aa	43,52 ± 6,22	Aa
	CT	3,22 ± 0,36	Ba	3,91 ± 0,66	Aa
B (mg kg⁻¹) *	TR	3,31 ± 0,73	Ba	4,02 ± 0,74	Aa
	CT	2,13 ± 1,46	Aa	2,62 ± 1,55	Aa
Mo (mg kg⁻¹) *	TR	2,03 ± 2,11	Aa	1,77 ± 0,38	Aa

* Médias ± (desvio padrão) (n = 6), dados paramétricos sendo realizado teste de Scott-Knott. ** Mediana ± (amplitude interquartil) (n = 6), dados não paramétricos sendo realizado teste de Kruskal Wallis. Ambos os testes com nível de significância de 5% (p < 0,05), onde são seguidas por letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha. Destaques em negrito indicam as maiores concentrações observadas para os parâmetros avaliados. CT: Controle, TR: *Trichoderma asperellum*; MED: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura média; ARG: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa; N: Nitrogênio; P: Fósforo; K: Potássio; S: Enxofre; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; B: Boro; Mo: Molibdênio.

Fonte: Autoral

Os parâmetros de nutrição do sorgo analisados (N, P, K, Mg, Cu, Fe, Zn e Mo) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ou tipos de solo (Tabela 5).

Esses resultados reforçam a importância das características intrínsecas dos solos na absorção de nutrientes pela planta e na resposta ao manejo aplicado, destacando o papel relevante da textura do solo no comportamento de elementos específicos.

5.5 Atividades enzimáticas e indicadores biológicos do solo

O tratamento com aplicação de *T. asperellum* aumentou a atividade de diacetato de fluoresceína tanto em solo de textura média como argiloso (Tabela 6), indicando um estímulo no metabolismo do solo, independente da classe de solo.

Tabela 6. Parâmetros analisados da atividade enzimática, respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (CBMS) e quociente metabólico (qCO_2) das áreas de solo de textura média e solo argiloso.

Parâmetros	Tratamento	Solo				
		MED		ARG		
Atividade Enzimática	FDA *	CT	1,38 ± 0,46	Ab	1,47 ± 0,34	Ab
		TR	2,28 ± 0,36	Aa	2,69 ± 0,16	Aa
	β – Glicosidase *	CT	11,92 ± 2,04	Bb	20,55 ± 6,59	Aa
		TR	10,57 ± 1,34	Bb	12,25 ± 1,11	Bb
	Fosfatase **	CT	11,16 ± 1,06	Ab	22,13 ± 1,53	Ab
		TR	2750,03 ± 1229,68	Aa	353,49 ± 59,96	Aa
	Arilsulfatase *	CT	967,33 ± 38,12	Ba	1039,70 ± 110,24	Aa
		TR	10,27 ± 1,85	Bb	20,17 ± 5,48	Ab
	RBS *	CT	0,31	Ba	0,45	Aa
		TR	0,42	Aa	0,37	Bb
	CBMS *	CT	46,48 ± 49,74	Bb	61,01 ± 47,43	Bb
		TR	19,78 ± 8,99	Bb	245,81 ± 30,85	Aa
	qCO ₂ **	CT	13,60 ± 11,71	Ab	10,43 ± 14,37	Bb
		TR	28,39 ± 22,35	Aa	1,54 ± 0,44	Bb

* Médias ± (desvio padrão) (n = 6), dados paramétricos sendo realizado teste de Scott-Knott. ** Mediana ± (amplitude interquartil) (n = 6), dados não paramétricos sendo realizado teste de Kruskal Wallis. Ambos os testes com nível de significância de 5% ($p <$

0,05), onde são seguidas por letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha. Destaques em negrito indicam as maiores concentrações observadas para os parâmetros avaliados. CT: Controle, TR: *Trichoderma asperellum*; MED: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura média; ARG: Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa; FDA: Hidrólise de Diacetato de Fluoresceína; β -glicosidase; Fosfatase ácida; Arilsulfatase; RBS: Respiração Basal do Solo; CBM – S: Carbono da Biomassa Microbiana; qCO₂: quociente metabólico de CO₂.

Fonte: Autoral

A fosfatase apresentou maior atividade no tratamento com aplicação de *T. asperellum* tanto no solo de textura média, como no solo argiloso (Tabela 6). Confirma-se na cultura do sorgo este achado já relatado na literatura para cultura de milho e soja (Barbosa *et al.*, 2022). Um solo com maior atividade metabólica é mais eficiente na mineralização de nutrientes, incluindo o P, que é essencial para o crescimento das plantas. A interação entre os microrganismos do solo e as raízes das plantas facilita a transformação de formas não disponíveis de nutrientes em formas que são prontamente absorvidas pelas plantas. Essa mineralização é fundamental, especialmente em solos que muitas vezes apresentam limitações de P, pois aumenta a disponibilidade desse macronutriente sem a necessidade de aplicações excessivas de fertilizantes (Pan *et al.*, 2024).

A aplicação de *Trichoderma asperellum* no solo argiloso resultou em um aumento do carbono da biomassa microbiana (Tabela 6), indicando que o manejo biológico pode promover a atividade microbiana de forma mais eficaz nessa classe de solo. Estudos mostram que a inoculação com fungos benéficos pode aumentar a biomassa microbiana e a atividade respiratória (Obayomi *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2018).

A aplicação do *Trichoderma asperellum* resultou em um aumento do quociente metabólico de CO₂ no solo de textura média (Tabela 6). Esses resultados sugerem que a atividade microbiana é mais intensa no tratamento biológico, refletindo uma maior eficiência na decomposição da MO. A literatura também aponta que a aplicação de fungos como o *Trichoderma asperellum* pode aumentar a eficiência na decomposição, contribuindo para a saúde do solo e a sustentabilidade agrícola (Barbosa *et al.*, 2022).

A aplicação de *T. asperellum* elevou a RBS no solo de textura média (Tabela 6), sugerindo maior atividade microbiana. Em contraste, no solo argiloso, houve redução desse parâmetro, indicando um ambiente microbiológico mais equilibrado. Neste último,

os maiores valores foram observados no tratamento controle. No entanto, as diferenças entre esses tratamentos não foram estatisticamente significativas.

No solo argiloso, o controle apresentou a maior atividade de arilsulfatase, seguido pelo tratamento com aplicação de *Trichoderma asperellum*. Entretanto, as diferenças entre esses tratamentos não foram estatisticamente significativas (Tabela 6). Esse resultado sugere que o manejo biológico influencia a atividade enzimática de maneira complexa, possivelmente devido a interações específicas entre os fungos aplicados e as comunidades microbianas nativas, mesmo sem diferenças significativas entre as texturas nos tratamentos controle (Moreira *et al.*, 2021; Schnürer e Rosswall, 1982).

O tratamento controle apresentou uma maior atividade da enzima β -glicosidase no solo argiloso (Tabela 6), sugerindo que essa condição favorece a atividade microbiana. Esse resultado está alinhado com estudos que indicam a influência da textura do solo na atividade enzimática, sendo que solos de textura argilosa tendem a reter mais umidade e nutrientes, beneficiando os microrganismos (Dexter, 2004; Vinhal-Freitas *et al.*, 2017).

De forma complementar, a relação entre os parâmetros microbiológicos e a MO demonstram como a textura influencia a dinâmica microbiana e a eficiência do uso do carbono. No solo de textura média, apesar dos teores elevados de MO, a aplicação de *Trichoderma asperellum* resultou em um maior qCO_2 e em um CBM – S baixo. Esse cenário sugere que a microbiota está sob estresse, promovendo uma degradação acelerada da MO, possivelmente devido à menor retenção de MO nessa classe de solo ou à interferência de outros microrganismos. Em contraste, no solo argiloso tratado com *T. asperellum*, os valores mais elevados de CBMS e um qCO_2 reduzido indicam uma microbiota equilibrada, utilizando o carbono de maneira eficiente e sem sinais de estresse.

Esses resultados evidenciam a influência da textura do solo na resposta microbiana ao manejo biológico, destacando o papel do *T. asperellum* na estabilidade microbiológica, especialmente em solos argilosos. Assim, o manejo biológico com *T. asperellum* se mostra uma estratégia promissora para otimizar a atividade enzimática e a dinâmica microbiana do solo, promovendo um ambiente mais favorável para o crescimento das plantas e a sustentabilidade agrícola.

6 CONCLUSÃO

O isolado *Trichoderma asperellum* CCT-7830 tem potencial como bioinsumo ao melhorar a atividade enzimática (FDA e fosfatase) nos solos de textura média e argilosa. Além disso, em solo argiloso, aumentou a biomassa microbiana e diminuiu o quociente metabólico. Esses resultados indicam que seu uso é uma estratégia eficaz para práticas agrícolas mais sustentáveis, promovendo melhorias na qualidade biológica do solo. No entanto, é importante destacar que houve redução de atividade de arilsulfatase nos dois solos e de β -glicosidase no solo argiloso, enquanto não houve diferenças significativas na massa seca e produtividade. Dessa forma, a eficiência do *Trichoderma asperellum* foi mais relacionada à promoção da saúde do solo e ao suporte de processos biológicos do que a impactos diretos na produtividade vegetal em curto prazo. Assim, seu uso pode ser particularmente vantajoso em solos com maior capacidade de retenção de nutrientes, como os argilosos, ou em sistemas agrícolas que priorizem a sustentabilidade a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, Gillian; DUNCAN, Harry. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. **Soil biology and biochemistry**, v. 33, n. 7-8, p. 943-951, 2001. DOI [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3)
- AHMED, G. A.; MAKHLOUF, A. H.; SELIM, M. E. Efficacy of Compost and Some Biocontrol Agents in Controlling Cucumber White Mould Disease under Protected House Conditions. **Alexandria Science Exchange Journal**, v. 42, n. 2, p. 495–507, 30 jun. 2021. DOI <https://doi.org/10.21608/asejaiqsae.2021.178433>
- AL-ASKAR, Abdulaziz A. et al. Crude citric acid of *Trichoderma asperellum*: tomato growth promotor and suppressor of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 222, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/plants10020222>
- ALMEIDA, Yuri Teixeira. Mapa do município de Uberlândia, MG. Escala não especificada. Referencial Geodésico: SIRGAS 2000. Base cartográfica: IBGE, 2020. Uberlândia, 2025.
- ALTHOFF, D. et al. O clima do Cerrado. 2023.
- ALVES, G. S. et al. Fungal endophytes inoculation improves soil nutrient availability, arbuscular mycorrhizal colonization and common bean growth. **Rhizosphere**, p. 100330, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100330>
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH,

on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology & Biochemistry, Oxford**, v. 25, n. 3, p. 393-395, mar. 1993. DOI [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)

ASHRAF, M. N.; WAQAS, M. A.; RAHMAN, S. Microbial metabolic quotient is a dynamic indicator of soil health: trends, implications and perspectives. **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 12, p. 1794-1803, 2022. DOI <https://doi.org/10.1134/S1064229322700119>

ASIS, Azriah et al. Identification patterns of Trichoderma strains using morphological characteristics, phylogenetic analyses and lignocellulolytic activities. **Molecular biology reports**, v. 48, p. 3285-3301, 2021. DOI <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06321-0>

Associação Nacional para Difusão Nacional de Adubos – ANDA. (2023). Anuário estatístico do setor de fertilizantes São Paulo: ANDA. Disponível em: <https://anda.org.br/pesquisa_setorial/>. Acesso em: 24 set. 2024

AZEVEDO, Lucas Carvalho Basilio et al. Microbial contribution to the carbon flux in the soil: A literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0230065, 2024. DOI <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20230065>

BARBOSA, Bruno Borges et al. Ascomycetous isolates promote soil biological and nutritional attributes in corn and soybeans in sandy and clayey soils. **Rhizosphere**, v. 24, p. 100625, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100625>

BARBOSA, Julierme Zimmer et al. Soil enzymatic activity in Brazilian biomes under native vegetation and contrasting cropping and management. **Applied Soil Ecology**, v. 190, p. 105014, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105014>

BASU, Sahana et al. Role of soil microbes in biogeochemical cycle for enhancing soil fertility. In: **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering**. Elsevier, 2021. p. 149-157. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64325-4.00013-4>

BERGQUIST, Galen et al. Soil microbial and plant biomass carbon allocation within perennial and annual grain cropping systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 383, p. 109535, 2025. DOI <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109535>

BHATTACHARYYA, Siddhartha Shankar et al. Soil carbon sequestration, greenhouse gas emissions, and water pollution under different tillage practices. **Science of the Total Environment**, v. 826, p. 154161, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154161>

BRAGA, Adeliene Ferreira et al. Interaction between Trichoderma asperellum and Bacillus spp. in the biological control of disease in the soya bean. **Revista Ciência Agronômica**, v. 56, p. e202294124, 2025. DOI <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20250041>

BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 6, 27 maio 2020.

BROOKES, P.C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology & Biochemistry, Oxford**, v. 14, n. 4, p. 319-329, 1982. DOI [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(82\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90001-3)

CABRAL, Lídia; PANDEY, Poonam; XU, Xiuli. Epic narratives of the green revolution in Brazil, China, and India. **Agriculture and Human Values**, v. 39, n. 1, p. 249-267, 2022. DOI <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10241-x>

CAI, Feng et al. The current state of Trichoderma taxonomy and species identification. In: **Advances in Trichoderma biology for agricultural applications**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 3-35. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-91650-3_1

CHAGAS, Lillian França Borges et al. Trichoderma asperellum efficiency in soybean yield components. **Comunicata Scientiae**, v. 8, n. 1, p. 165-169, 2017. DOI <https://doi.org/10.14295/cs.v8i1.1754>

CHAKRABORTY, Tanushree; AKHTAR, Nasim. Biofertilizers: prospects and challenges for future. **Biofertilizers: study and impact**, p. 575-590, 2021. DOI <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch20>

CHEN, Zigeng; LEFFLER, A. Joshua. Soil basal respiration and nitrogen mineralization from C3 and C4 grass dominated plant communities respond differently to temperature and soil water variation. **Journal of Arid Environments**, v. 224, p. 105235, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105235>

CHIN, Jia May; LIM, Yau Yan; TING, Adeline Su Yien. Biopriming vegetable seeds with metal-tolerant biocontrol agents to enhance tolerance to biotic and abiotic stress. **Biological Control**, v. 174, p. 105035, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105035>

Conab - Boletim da Safra de Grãos. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 22 nov. 2024.

CropLife Brasil. **Mercado de bioinsumos cresceu 15% na safra 2023/2024**. Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/noticias/mercado-de-bioinsumos-cresceu-15-na-safra-2023-2024/>>. Acesso em: 25 set. 2024.

DA SILVEIRA, A. A. et al. Larvicidal potential of cell wall degrading enzymes from *Trichoderma asperellum* against *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). **Biotechnology Progress**, v. 37, n. 5, p. e3182, set. 2021. DOI <https://doi.org/10.1002/btpr.3182>

DAVIES, Benjamin; COULTER, Jeffrey A.; PAGLIARI, Paulo H. Soil enzyme activity behavior after urea nitrogen application. **Plants**, v. 11, n. 17, p. 2247, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/plants11172247>

DE MIRANDA SANTOS, Luana et al. Bioinputs: a sustainable alternative to traditional pesticide cultivation. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 12, p. 24777-24816, 2023. DOI <https://doi.org/10.55905/oelv21n12-073>

DE OLIVEIRA SILVA, Michelangelo et al. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. DOI <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. DOI <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>

DÍAZ-GUTIÉRREZ, Carol et al. Trichoderma asperellum as a preventive and curative agent to control Fusarium wilt in Stevia rebaudiana. **Biological Control**, v. 155, p. 104537, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104537>

DING, S. J. et al. Soil nutrients and aggregate composition of four soils with contrasting textures in a long-term experiment. **Eurasian Soil Science**, v. 54, p. 1746-1755, 2021. DOI <https://doi.org/10.1134/S1064229321110041>

DUQUE, Tayna Sousa et al. Herbicides and bio-inputs: Compatibility and challenges for sustainable agriculture. **Chemosphere**, v. 369, p. 143878, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143878>

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY [EEA], **Soil**. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/soil>>. Acesso em: 2 maio. 2024.

FALL, Abdoulaye Fofana et al. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil. **Frontiers in Fungal Biology**, v. 3, p. 723892, 2022. DOI <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.723892>

FAO. **FAOSTAT Production / Crops and livestock products**. Rome, Italy 2023. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 22 nov. 2024.

FARIAS, C. P. et al. A consortium of fungal isolates and biochar improved the phytoremediation potential of Jacaranda mimosifolia D. Don and reduced copper, manganese, and zinc leaching. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 1, p. 260-271, 2020. DOI <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02414-3>

FARIAS, C. P. et al. Consortium of five fungal isolates conditioning root growth and arbuscular mycorrhiza in soybean, corn, and sugarcane. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 4, p. 3649-3660, 2018. DOI <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820180161>

FU, Jian et al. Trichoderma asperellum alters fungal community composition in saline–alkaline soil maize rhizospheres. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 4, p. 1091-1104, 2021. DOI <https://doi.org/10.1002/saj2.20245>

GABOARDI, Shaiane Carla; CANDIOTTO, Luciano Zanetti Pessôa; PANIS, Carolina. Agribusiness in Brazil and its dependence on the use of pesticides. **Hygiene and Environmental Health Advances**, v. 8, p. 100080, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.heha.2023.100080>

GABRIELLI, Paolo et al. Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources. **One Earth**, v. 6, n. 6, p. 682-704, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.006>

GAVRILESCU, Maria. Water, soil, and plants interactions in a threatened environment. **Water**, v. 13, n. 19, p. 2746, 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/w13192746>

GORAI, Pralay Shankar et al. Trichoderma. In: **Beneficial Microbes in Agro-Ecology**. Academic Press, 2020. p. 571-591. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00028-9>

HAKIM, Sughra et al. Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 617157, 2021. DOI <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>

HAVLIN, John; HEINIGER, Ron. Soil fertility management for better crop production. **Agronomy**, v. 10, n. 9, p. 1349, 2020. DOI <https://doi.org/10.3390/agronomy10091349>

HEMKEMEYER, Michael et al. Functions of elements in soil microorganisms. **Microbiological Research**, v. 252, p. 126832, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126832>

ILLESCAS, María et al. Effect of Trichoderma asperellum on wheat plants' biochemical and molecular responses, and yield under different water stress conditions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 12, p. 6782, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/ijms23126782>

INTANA, Warin et al. Biological control potential of a soil fungus Trichoderma asperellum K1-02 against Neoscytalidium dimidiatum causing stem canker of dragon fruit. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 128, p. 102151, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2023.102151>

JAMBHULKAR, Prashant P. et al. Genetic diversity and antagonistic properties of Trichoderma strains from the crop rhizospheres in southern Rajasthan, India. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 8610, 2024. DOI <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58302-5>

JAVED, Ansa et al. Soil fertility: Factors affecting soil fertility, and biodiversity responsible for soil fertility. **International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences**, v. 12, n. 1, p. 21-33, 2022. DOI <https://doi.org/10.26502/ijpaes.202129>

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 8, n. 3, p. 209-213, 1976. DOI [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5)

KARUPPIAH, Valliappan et al. Trichoderma asperellum GDFS1009-mediated maize resistance against Fusarium graminearum stalk rot and mycotoxin degradation. **Biological control**, v. 174, p. 105026, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105026>

KUMAR, P. Green Revolution and its impact on environment. **International Journal of Research in Humanities & Social Sciences**, v.5, n. 3, p.54-57, 2017.

LI, Lijuan et al. Genome sequence of the fungus Trichoderma asperellum SM-12F1 revealing candidate functions of growth promotion, biocontrol, and bioremediation. **PhytoFrontiers™**, v. 1, n. 3, p. 239-243, 2021. DOI <https://doi.org/10.1094/PHYTOFR-12-20-0052-A>

LI, Peng et al. Global-scale no-tillage impacts on soil aggregates and associated carbon and nitrogen concentrations in croplands: a meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 881, p. 163570, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163570>

LUZ, R. D. C. R. D. et al. Entrophospora etunicata: A mycorrhizal biostimulant with the potential to enhance the production of bioactive health-promoting compounds in leaves of Capsicum chinense seedlings. **Rhizosphere**, v. 28, p. 100791, dez. 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100791>

M. TAHAT, Monther et al. Soil health and sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 4859, 2020. DOI <https://doi.org/10.3390/su12124859>

MAÇIK, Mateusz; GRYTA, Agata; FRĄC, Magdalena. Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. **Advances in agronomy**, v. 162, p. 31-87, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>

MALDANER, Joseila et al. Tolerance of Trichoderma isolates to increasing concentrations of heavy metals. **International Journal of Environmental Studies**, v. 78, n. 2, p. 185-197, 2021. DOI <https://doi.org/10.1080/00207233.2020.1778290>

MAURYA, Swati et al. Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, p. 1-22, 2020. DOI <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08556-z>

MENEZES, C. B. de (ed.). **Melhoramento genético de sorgo**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 546 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1138157/melhoramento-genetico-de-sorgo>.

MOHAMED, Bereika FF et al. Approving the biocontrol method of potato wilt caused by Ralstonia solanacearum (Smith) using Enterobacter cloacae PS14 and Trichoderma asperellum T34. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 30, p. 1-13, 2020. DOI <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00262-9>

MOREIRA, Cíntia Prates et al. Biochemical activity and microbial biomass in wetlands (Vereda) and well-drained soils under native vegetation types in Brazilian Cerrado. **Applied Soil Ecology**, v. 160, p. 103840, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103840>

MORENO-ESPÍNDOLA, Iván Pável et al. Reflections on microbial genetic resources in agricultural systems. **Current Research in Microbial Sciences**, p. 100337, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100337>

MUKHOPADHYAY, Ria; KUMAR, Deepak. Trichoderma: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential. **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 30, p. 1-8, 2020. DOI <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00333-x>

OBUYOMI, Olabiyi et al. Soil texture and properties rather than irrigation water type shape the diversity and composition of soil microbial communities. **Applied Soil Ecology**, v. 161, p. 103834, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103834>

ORTIZ, Aurelio; SANSINENEA, Estibaliz. The role of beneficial microorganisms in soil quality and plant health. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5358, 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/su14095358>

PAN, C. et al. Microbial community interactions determine the mineralization of soil organic phosphorus in subtropical forest ecosystems. **Microbiology Spectrum**, v. 12, n. 3, p. e01355-23, 5 mar. 2024. DOI <https://doi.org/10.1128/spectrum.01355-23>

PAUMGARTTEN, Francisco JR. Pesticides and public health in Brazil. **Current opinion in toxicology**, v. 22, p. 7-11, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2020.01.003>

POVEDA, Jorge. Trichoderma as biocontrol agent against pests: New uses for a mycoparasite. **Biological Control**, v. 159, p. 104634, 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104634>

PRISMANTORO, Dedat et al. The multifaceted roles of Trichoderma in managing rice diseases for enhanced productivity and sustainability. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101324, 2024. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101324>

RABUSKE, Jéssica Emília et al. Trichoderma asperellum in the biocontrol of Lasiodiplodia theobromae and Pseudofusicoccum kimberleyense. **Journal of Plant Protection Research**, p. 488-498-488-498, 2023.

RAI, Pankaj K. et al. Role and potential applications of plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agriculture. In: **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering**. Elsevier, 2020. p. 49-60. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820526-6.00004-X>

RASHMI, I. et al. Soil Erosion and sediments: a source of contamination and impact on agriculture productivity. In: **Agrochemicals in Soil and Environment: Impacts and Remediation**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 313-345. DOI https://doi.org/10.1007/978-981-16-9310-6_14

RÄTY, Mari et al. Estimating cation exchange capacity and clay content from agricultural soil testing data. **Agricultural and Food Science**, v. 30, n. 4, p. 131–145-131–145, 2021. DOI <https://doi.org/10.23986/afsci.111107>

REZENDE, C. C. et al. Multifunctional microorganisms: use in agriculture. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e50810212725, 2021. DOI <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12725>

RIVERA-MENDEZ, William et al. Trichoderma asperellum biocontrol activity and induction of systemic defenses against Sclerotium cepivorum in onion plants under tropical climate conditions. **Biological Control**, v. 141, p. 104145, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104145>

SALDANA-MENDOZA, Salvador A.; CHAVEZ-GONZALEZ, Monica L.; AGUILAR GONZALEZ, Cristobal N. Protocol for the production of trichoderma spores for use as a biological control agent through the revalorization of agro-industrial waste. In: **Food Waste Conversion**. New York, NY: Springer US, 2023. p. 169-176. DOI https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3303-8_12

SARAVANAKUMAR, Kandasamy et al. Trichoderma-functional metabolomics to genetic engineering. In: **New and Future Developments in Microbial Biotechnology**

and Bioengineering. Elsevier, 2020. p. 209-220. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819453-9.00010-6>

SAYGIN, Fikret et al. Soil quality assessment based on hybrid computational approach with spatial multi-criteria analysis and geographical information system for sustainable tea cultivation. **The Journal of Agricultural Science**, v. 161, n. 2, p. 187-204, 2023. DOI <https://doi.org/10.1017/S0021859623000138>

SCHNÜRER, Johan; ROSSWALL, Thomas. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and environmental microbiology**, v. 43, n. 6, p. 1256-1261, 1982. DOI <https://doi.org/10.1128/aem.43.6.1256-1261.1982>

SEBUMPAN, Rea et al. Morphological and molecular identification of *Trichoderma asperellum* isolated from a dragon fruit farm in the southern Philippines and its pathogenicity against the larvae of the super worm, *Zophobas morio* (Fabricius, 1776)(Coleoptera: Tenebrionidae). **Egyptian Journal of Biological Pest Control**, v. 32, n. 1, p. 1-7, 2022. DOI <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00548-0>

SENGUPTA, Sauratej; DATTA, Maithili; DATTA, Supratim. β -Glucosidase: Structure, function and industrial applications. In: **Glycoside Hydrolases**. Academic Press, 2023. p. 97-120. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91805-3.00004-6>

SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SINGH, Prachi et al. Microbial volatiles (mVOCs) induce tomato plant growth and disease resistance against wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 43, n. 9, p. 3105-3118, 2024. DOI <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11060-6>

SINGH, Teg Bahadur et al. Role of organic fertilizers in improving soil fertility. **Contaminants in agriculture: sources, impacts and management**, p. 61-77, 2020. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_3

SOBUCKI, Lisiane et al. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0210109, 2021. DOI <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210109>

SOOD, Monika et al. *Trichoderma*: The “secrets” of a multitaled biocontrol agent. **Plants**, v. 9, n. 6, p. 762, 2020. DOI <https://doi.org/10.3390/plants9060762>

SOUZA, IDA dos S. et al. Yield and nutritional value of biomass sorghum (BRS 716) managed in different row spacing and maturity at harvest in the semiarid region of Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 6, p. 3463–3484, 12 ago. 2021. DOI <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n6p3463>

SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial- C - calibration in situ using microbial respiration and ^{14}C -labeled cells. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 3, p. 337-343, 1988. DOI [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90014-4)

Special Report on Climate Change and Land — IPCC site., 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-1/>>. Acesso em: 18 abr. 2024

SZYCHTA, G. et al. Fertilizer market: the relevance of the port of Paranaguá (Paraná, Brazil) in the import of chemical fertilizers. Em: FERNANDES, A. M. et al. (Eds.). **Coleção Universitária**. 1. ed. [s.l.] Editora FaCiencia, 2024. p. 8–22. DOI <https://doi.org/10.29327/5345677.1-1>

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (ed.). **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. **Madison: Soil Science Society of America**, 1994, p. 775 -833. DOI <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; VLKWEISS, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A; TEIXEIRA, W.G. 2017. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa. 573 p.

United Nations - World Population Prospects 2022: Summary of Results - Population Division. Disponível em: <<https://population.un.org/wpp/>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703 707, 1987. DOI [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)

VELMURUGAN, Balasubramanian et al. Sweet sorghum: a potential resource for bioenergy production. In: **Refining biomass residues for sustainable energy and bioproducts**. Academic Press, 2020. p. 215-242. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818996-2.00010-7>

VELOSO, Fernanda Rosa et al. Different soil textures can interfere with phosphorus availability and acid phosphatase activity in soybean. **Soil and Tillage Research**, v. 234, p. 105842, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105842>

VINHAL-FREITAS, Isabel C. et al. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecological indicators**, v. 74, p. 182-190, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science, Baltimore**, v. 37, p. 29-38, 1934. DOI <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

WANG, Rui et al. Biocontrol of cucumber Fusarium wilt by *Trichoderma asperellum* FJ035 dependent on antagonism and spatiotemporal competition with *Fusarium oxysporum*. **Biological Control**, v. 186, p. 105334, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105334>

WEI, Beilei et al. Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: a meta-analysis. **Geoderma**, v. 437, p. 116591, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116591>

WISE, Timothy A. Old fertilizer in new bottles: Selling the past as innovation in Africa's Green Revolution. 2021.

WITT, C.; GAUNT, J. L.; GALICIA, C. C.; OTTOW, J. C. G.; NEUE, H. U. A rapid chloroform- fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon and nitrogen in flooded rice soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 30, n. 5-6, p. 510-519, mar. 2000. DOI <https://doi.org/10.1007/s003740050030>

WU, Shu-Hong et al. The aboveground vegetation type and underground soil property mediate the divergence of soil microbiomes and the biological interactions. **Microbial ecology**, v. 75, p. 434-446, 2018. DOI <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1050-7>

YANG, Yiling et al. Isolation and identification of *Trichoderma asperellum*, the novel causal agent of green mold disease in sweetpotato. **Plant Disease**, v. 105, n. 6, p. 1711-1718, 2021. DOI <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-20-1484-RE>

YU, Mengjiao et al. Detection, production, modification, and application of arylsulfatases. **Biotechnology Advances**, v. 67, p. 108207, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108207>

ZHANG, Chao et al. An improved method of fluorescein diacetate determination for assessing the effects of pollutants on microbial activity in urban river sediments. **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 10, p. 2792-2801, 2022. DOI <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03319-4>

ZIN, Nur A.; BADALUDDIN, Noor A. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. **Annals of Agricultural Sciences**, v. 65, n. 2, p. 168-178, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2020.09.003>