



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM AGRONOMIA

ELYMAR JOSÉ DA SILVA FERREIRA

USO DO BIOCHAR E CARVÃO ASSOCIADO AO *Bacillus subtilis* NA
PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO DA CULTURA DO MILHO

Presidente Prudente - SP
2025

ELYMAR JOSÉ DA SILVA FERREIRA

**USO DE CARVÃO E BIOCHAR ASSOCIADO AO *Bacillus subtilis* NA
PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO DA CULTURA DO MILHO**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Fernando de Araújo.

Catálogo Internacional de Publicação (CPI)

633.15
F383u

Ferreira, Elymar José da Silva

Uso de carvão e biochar associado ao *Bacillus subtilis* na promoção do crescimento da cultura do milho / Elymar José da Silva Ferreira. -- Presidente Prudente, 2025.

55 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2025.

Bibliografia.

Orientador: Fábio Fernando de Araújo

1. Atividade microbiana. 2. Enzimas do solo. 3. *Zea mays*. I.
Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “USO DO BIOCHAR E CARVÃO ASSOCIADO AO *BACILLUS SUBTILIS* NA PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO DA CULTURA DO MILHO”

AUTOR(A): ELYMAR JOSÉ DA SILVA FERREIRA

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. FABIO FERNANDO DE ARAÚJO

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em AGRONOMIA

Área de Concentração PRODUÇÃO VEGETAL, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. FABIO FERNANDO DE ARAÚJO (orientador)

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. ALEXANDRIUS DE MORAES BARBOSA

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Profa. Dra. LORRAYNE GUIMARÃES BAVARESCO

EDEM - Agrominerais / Goiânia (GO)

Data da realização: Presidente Prudente, 23 de abril de 2025.

Central de Assinaturas Eletrônicas

Sobre o documento

Assunto: Documento eletrônico
Status do documento: Concluído
Data de criação do documento: 06/05/2025 10:17
Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília
Número de assinaturas: 3
Solicitante: KEID RIBEIRO KRUGER (#6117539)

Signatários do documento

FABIO FERNANDO DE ARAUJO (PROFESSOR)

fabio@unoeste.br
Recebido em 06/05/2025 10:17
Assinado em 07/05/2025 12:06
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 148.222.129.25
ID da assinatura: 4793275

LORRAYNE GUIMARÃES BAVARESCO (SIGNATÁRIO EXTERNO)

lgbavaresco@hotmail.com
Recebido em 06/05/2025 10:17
Assinado em 09/05/2025 18:56
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 187.91.26.241
ID da assinatura: 4793276

ALEXANDRIUS DE MORAES BARBOSA (PROFESSOR)

alexandrius@unoeste.br
Recebido em 06/05/2025 10:17
Assinado em 06/05/2025 13:37
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 177.131.39.1
ID da assinatura: 4793277

URL do documento: <https://www.unoeste.br/ca/cfeef188>

Assinatura digital do documento: 78a73be8eef67d27a0e5c356ff7f4726c588c0ba6209715e51d88b0f18cf205c

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista

Mantida pela Associação Prudentina de Educação e Cultura - APEC

Utilize o QRCode abaixo para conferir a autenticidade deste documento:



RESUMO

Uso de carvão e biochar associado ao *Bacillus Subtilis* na promoção do crescimento da cultura do milho

O uso de condicionadores de solo associados a rizobactérias pode proporcionar mudanças na qualidade do solo permitindo avanços na agricultura sustentável. O objetivo deste estudo foi investigar a resposta do uso do biochar e carvão associado ao *Bacillus subtilis* na atividade microbiana do solo e rendimento do milho. O experimento foi conduzido em dois locais com solo distintos (arenoso e argiloso) na safrinha do milho em condições de cerrado no ano de 2024. Os tratamentos consistiram na aplicação de carvão e biochar isoladamente ou associado com *B. subtilis* antes da semeadura do milho. O delineamento experimental foi de bloco casualizado com quatro repetições. Foi realizada a avaliação de atividade microbiana do solo, representado pela análise de biomassa microbiana, respiração e atividade enzimática do solo e crescimento do milho aos 60 dias e no final do ciclo da cultura foi realizada a avaliação de rendimento do milho em grãos. Foram encontradas respostas distintas nos atributos biológicos do solo em função da adição de resíduos e rizobactérias. A introdução de *Bacillus subtilis* aumentou a atividade das enzimas desidrogenase e arilsulfatase, enquanto o carvão elevou a atividade da glicosidase e fosfatase em solo arenoso. Além disso, a inoculação isolada de *B. subtilis* apresentou o melhor desempenho na promoção do rendimento do milho em dois locais avaliados. O estudo foi conduzido em um período experimental limitado, o que pode ter influenciado os resultados dos tratamentos empregados. A interação entre biochar e *B. subtilis*, assim como entre carvão e *B. subtilis*, não obtiveram diferenças entre os tratamentos avaliados no experimento. A introdução dessa rizobactéria pode representar uma estratégia promissora para a melhoria da qualidade biológica do solo e do desempenho agrônômico da cultura do milho, especialmente em curto prazo.

Palavras chaves: atividade microbiana; enzimas do solo; *Zea mays*.

ABSTRACT

Use of charcoal and biochar associated with *Bacillus Subtilis* to promote corn crop growth

The use of soil conditioners associated with rhizobacteria can provide changes in soil quality, allowing advances in sustainable agriculture. The objective of this study was to investigate the response of the use of biochar and charcoal associated with *Bacillus subtilis* on soil microbial activity and corn yield. The experiment was conducted in two locations with distinct soils (sandy and clayey) in the corn second crop under cerrado conditions in the year 2024. The treatments consisted of the application of charcoal and biochar alone or associated with *B. subtilis* before corn sowing. The experimental design was a randomized block with four replications. The evaluation of soil microbial activity was performed, represented by the analysis of microbial biomass, respiration and enzymatic activity of the soil and corn growth at 60 days and at the end of the crop cycle, the evaluation of corn grain yield was performed. Distinct responses were found in soil biological properties as a function of the addition of residues and rhizobacteria. The introduction of *Bacillus subtilis* increased the activity of dehydrogenase and arylsulfatase enzymes, while charcoal increased the activity of glucosidase and phosphatase in sandy soil. In addition, the isolated inoculation of *B. subtilis* showed the best performance in promoting corn yield in two evaluated locations. The study was conducted in a limited experimental period, which may have influenced the results of the treatments used. The interaction between biochar and *B. subtilis*, as well as between charcoal and *B. subtilis*, did not show differences between the treatments evaluated in the experiment. The introduction of this rhizobacteria may represent a promising strategy for improving soil biological quality and agronomic performance of corn crops, especially in the short term.

Keywords: microbial activity; soil enzymes; *Zea mays*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 —	Análise de fertilidade de solo parâmetro físico do experimento.....	23
Tabela 2 —	Análise de fertilidade de solo parâmetro químico do experimento.....	23
Tabela 3 —	Precipitação no ano de 2024 nos municípios de Tapurah e Sorriso.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 —	Componentes que contribuem para a qualidade do solo.....	13
Figura 2 —	Precipitação no ano de 2024 de janeiro a junho nos municípios de Sorriso e Tapurah.....	26
Figura 3 —	Valores médios de atributos microbianos de biomassa de C (A), de respiração do solo (B) e quociente metabólico (C) no solo em função da interação com biochar, carvão e B. subtilis no município de Sorriso e no município de Tapurah.....	29
Figura 4 —	Valores médios de atividade de desidrogenase (A) e de arilsulfatase (B) em função da interação com biochar, carvão e B. subtilis no município de Sorriso e no município de Tapurah.....	30
Figura 5 —	Valores médios de atividade de fosfatase (A) de FDA (B) e glicosidase (C) em função da interação com biochar, carvão e B. subtilis no município de Sorriso e no município de Tapurah.....	32
Figura 6 —	Valores médios de altura de planta (A), inserção de espiga (B), diâmetro do colmo (C) em função da interação com biochar, carvão e B. subtilis no município de Sorriso e no município de Tapurah.....	33
Figura 7 —	Valores médios da produtividade em grãos por hectare de milho em função da interação com biochar, carvão e B. subtilis no município de Sorriso e no município de Tapurah.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	Características agronômicas do milho.....	11
2.2	A qualidade do solo como fator relevante para a sustentabilidade..	12
2.3	A microbiologia do solo na agricultura sustentável.....	15
2.4	A função dos organismos oligotróficos e copiotróficos em solos arenosos e argilosos.....	16
2.5	<i>Bacillus subtilis</i> : espécie microbiana versátil para aplicações biotecnológicas.....	17
2.6	O uso do biochar como condicionador do solo.....	18
2.7	Biochar, carvão e <i>Bacillus subtilis</i> : diferenças, definições e aplicações na agricultura sustentável.....	20
2.8	Fertilidade do solo e a produtividade agrícola.....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4	RESULTADOS.....	28
4.1	Avaliação dos atributos microbianos do solo.....	28
4.2	Atividades enzimáticas do solo.....	30
4.3	Análise crescimento do milho.....	33
5	DISCUSSÃO.....	36
6	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso finito e essencial para a agricultura, sendo a principal ferramenta para o desenvolvimento das plantas, pois fornece os nutrientes necessários para seu crescimento (Steffen *et al.*, 2024). A qualidade do solo está diretamente relacionada ao seu bom funcionamento, e sua avaliação deve considerar aspectos físicos, químicos e biológicos, além das necessidades socioeconômicas e o planejamento de agroecossistemas diversificados (Camargo, 2016).

A nutrição adequada do solo é fundamental para o cultivo do milho, cultura que exige diferentes nutrientes para seu crescimento, como nitrogênio, fósforo e potássio. A aplicação equilibrada de fertilizantes, no momento adequado, contribui para o desenvolvimento da planta e para a produtividade. Entretanto, práticas agrícolas intensivas podem causar degradação do solo, reduzindo a matéria orgânica e afetando sua fertilidade.

O uso de biochar, material carbonáceo produzido pela pirólise de biomassa, tem se mostrado uma alternativa para melhorar a retenção de água e a qualidade do solo. O biochar pode aumentar a porosidade, reduzir a compactação e melhorar a infiltração de água (Prochnow, 2023). Além disso, pode contribuir para a redução da erosão e aumentar a produtividade das plantas (Miranda *et al.*, 2017).

A associação do biochar com rizobactérias promotoras de crescimento, como *Bacillus subtilis*, pode potencializar seus benefícios. *B. subtilis* tem sido utilizado como inoculante agrícola, atuando na ciclagem de nutrientes e na proteção de plantas contra patógenos (Braga Júnior, 2015). No entanto, sua eficiência pode ser limitada em solos tropicais com pouca matéria orgânica. A associação com o biochar pode melhorar a sobrevivência da bactéria, aumentando sua eficácia na promoção do crescimento do milho.

A aplicação de biochar associado à rizobactéria *Bacillus subtilis* pode atuar como uma alternativa sustentável para mitigar os impactos ambientais decorrentes das práticas inadequadas de manejo do solo, promovendo a melhoria da qualidade do solo e o aumento da produtividade agrícola do milho. O biochar, por sua porosidade, favorece a retenção de água e cria um ambiente propício para microrganismos, enquanto *Bacillus subtilis* estimula o crescimento vegetal e aumenta a resistência a patógenos, contribuindo para a sustentabilidade agrícola.

O milho é um dos pilares da agricultura brasileira, com destaque para o estado de Mato Grosso, principal produtor nacional. Para a safra 2024/25, o Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária (IMEA) projeta uma área plantada de 6,84 milhões de hectares e uma produção de 45,84 milhões de toneladas, números ligeiramente inferiores aos da safra anterior devido a fatores como clima e sanidade das lavouras. A produtividade média esperada é de 111,72 sacas por hectare, representando uma queda de 3,35% em relação à safra anterior. O Valor Bruto da Produção (VBP) do milho no estado também recuou 21,68%, totalizando R\$ 31,52 bilhões, em função da redução nos preços e produção do cereal (IMEA, 2025).

O milho permanece como o segundo grão mais cultivado no Brasil, com previsão de produção de 330,3 milhões de toneladas na safra 2024/25, segundo a Conab (2025). Esse crescimento se deve ao aumento da área plantada, que deve atingir 81,7 milhões de hectares, e às condições climáticas favoráveis. Espera-se também uma recuperação de 8,6% na produtividade. As projeções indicam crescimento contínuo da produção até 2032/33, impulsionado por avanços tecnológicos e pela demanda por bioenergia.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo investigar a resposta do uso do biochar associado ao *Bacillus subtilis* na atividade microbiana do solo e no rendimento do milho, contribuindo para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Características agronômicas do milho

O milho (*Zea mays* L.) é um cereal essencial a segurança alimentar global, sendo utilizado na alimentação humana, na nutrição animal e na indústria. Na indústria, o milho também é usado na fabricação de bioplásticos, papel, medicamentos e bebidas (Coêlho, 2021).

Originário da América Central, onde era cultivado desde os tempos pré-colombianos, o milho é hoje uma das maiores culturas do mundo, sendo o Brasil um importante país produtor. Cultivado em todas as regiões do país, em mais de dois milhões de estabelecimentos rurais, o milho passou por transformações profundas nas últimas décadas, tornando-se uma cultura comercial eficiente (Contini *et al.*, 2019).

A produção de milho no Brasil é caracterizada pelo plantio em duas épocas: a primeira safra, durante o período chuvoso, e a segunda safra, conhecida como safrinha, plantada extemporaneamente após a colheita de outras culturas, principalmente da soja precoce. Esta prática, que começou há cerca de 25 anos, tem se expandido devido à demanda crescente e à valorização do milho (Pereira Filho; Cruz; Garcia, 2020).

Para garantir o sucesso do cultivo da safrinha, é essencial o planejamento cuidadoso, considerando a escolha adequada das cultivares, as condições climáticas e a capacidade do solo de reter umidade. A correção do solo com calcário e outros corretivos é fundamental, especialmente em regiões de solos com baixa fertilidade e ácidos (Silva; Esperancini, 2021).

O manejo do solo também desempenha um papel preponderante, especialmente em áreas de exploração agrícola intensiva, como na safrinha de milho, onde o solo é mais trabalhado. Decisões sobre manejo devem considerar as culturas envolvidas, as condições do solo e do clima, visando à obtenção de maiores rendimentos sem comprometer a produtividade a longo prazo (Carvalho, 2018).

Além disso, a nutrição adequada das plantas é essencial para melhorar sua tolerância aos estresses, como o déficit hídrico (Alves, 2021). A semente de milho, botanicamente classificada como cariopse, possui três partes: o pericarpo, o endosperma e o embrião. Condições ideais de temperatura e umidade são

necessárias para a germinação das sementes e o desenvolvimento saudável da cultura (Santos *et al.*, 2023).

O milho apresenta significativo potencial de resposta à utilização de bioinsumos, como *Bacillus subtilis* e biochar. O *B. subtilis* atua como promotor de crescimento vegetal ao produzir fitohormônios, como as auxinas, estimular o desenvolvimento radicular e melhorar a absorção de água e nutrientes. Além disso, esse microrganismo induz resistência sistêmica nas plantas e facilita a solubilização de fósforo, aumentando a eficiência nutricional (Costa; Silva; Ribeiro, 2013).

Por outro lado, o biochar, um material carbonizado obtido a partir da biomassa, favorece melhorias físicas e químicas no solo, como o aumento da capacidade de retenção de água, a estabilidade estrutural e a fixação de nutrientes essenciais, como o nitrogênio (Lehmann; Joseph, 2024). Essas propriedades contribuem para a redução da lixiviação e para a criação de microambientes que promovem a colonização por microrganismos benéficos (Chen *et al.*, 2016). Dessa forma, a associação entre *B. subtilis* e biochar pode potencializar o crescimento, a produtividade e a resiliência do milho, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos e contribuindo para a sustentabilidade agrícola.

2.2. A qualidade do solo como fator relevante para a sustentabilidade

Solo é o material que cobre a superfície da Terra, variando em espessura, composição, cor, fertilidade e outras características. É composto de água, ar, material mineral e orgânico, e abriga uma variedade de organismos vivos. Os solos são essenciais para a vida na Terra, pois fornecem suporte para as plantas e ajudam a regular o clima. Também são usados para a construção de casas, edifícios e estradas (Lepsch, 2016).

Os solos não são todos idênticos. Tais desigualdades existentes são decorrentes dos materiais que os solos são constituídos, dando-lhes assim, diferentes propriedades. Para Teixeira e Vieira (2018) o solo é um ambiente vivo e dinâmico. O meio científico, até o presente momento, ainda não conseguiu compreender todos os processos que ocorrem no solo, somente criou-se indicadores pertinentes a solos saudáveis e que admitem às plantas abrangerem altas produtividades.

Conforme escritos de Marques e Valladares (2021) o debate sobre a Qualidade do Solo (QS) ganhou destaque no início da década de 1990, à medida que a

comunidade científica, confirmando a relevância do solo para a manutenção da qualidade ambiental, passou a enfatizar em suas publicações a preocupação com a manipulação dos recursos naturais, a sustentabilidade da atividade agrícola e o papel fundamental do solo nesse cenário.

A qualidade do solo, citada também como saúde do solo, pode ser caracterizada como a capacidade do solo de funcionar continuamente como um ecossistema que possa sustentar plantas, animais e seres humanos. De maneira geral, esta qualificação está vinculada de seus próprios atributos, porém vincula-se também das práticas de utilização e manejo, assim como de interações com o ecossistema (Nogueira, 2020).

A qualidade do solo não está restrita somente aos solos agrícolas, mesmo que grande parcela dos trabalhos e estudos para a sua melhoria sejam realizados em sistemas agrícolas. Segundo estudos de Simon *et al.* (2022) os indicadores de qualidade do solo exigem atributos mensuráveis, de natureza quantitativa ou qualitativa, relacionados ao solo ou à planta, que refletem processos ou atividades e possibilitam a caracterização, avaliação e monitoramento das modificações ocorridas em um ecossistema específico.

Os sistemas de manejo que proporcionem agregados mais resistentes tornam-se desejáveis, pois apresentam capacidade de manter a estrutura do solo sem grandes alterações quando submetidos a forças externas, como pisoteio de animais e operações mecanizadas, e ainda maiores resistência a perdas por erosão (Salton *et al.*, 2008).

Sendo assim, um solo com qualidade tem que considerar, deste modo, pelo menos três componentes: o ambiente, a produção agropecuária e o bem-estar humano (Figura 1).

Figura 1 — Componentes que contribuem para a qualidade do solo.



Fonte: Embrapa (2013).

A qualidade do solo é um fator essencial para garantir a produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental, especialmente em sistemas de cultivo contínuo. Alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo ocorrem devido ao uso intensivo, manejo inadequado e prolongado, afetando diretamente sua capacidade de fornecer nutrientes e água para as plantas (Costa; Silva; Ribeiro, 2013).

A avaliação da qualidade do solo pode ser realizada por meio de indicadores físicos, químicos e biológicos. Os indicadores físicos, como a estrutura e a densidade do solo, estão relacionados ao armazenamento e à disponibilidade de água e oxigênio para as plantas. Os indicadores químicos, como o pH e a disponibilidade de nutrientes, fornecem informações sobre a fertilidade do solo. Já os indicadores biológicos, como a atividade microbiana e o teor de matéria orgânica, estão associados à saúde do solo e ao ciclo de nutrientes (Nogueira, 2020).

A intensificação da produção agrícola sem manejo adequado pode resultar na degradação do solo, reduzindo sua capacidade produtiva e aumentando os impactos ambientais, como a erosão e a contaminação por agroquímicos (Barros *et al.*, 2017). A implementação de práticas conservacionistas, como o uso de condicionadores de solo e a rotação de culturas, é fundamental para preservar a qualidade do solo e garantir a sustentabilidade agrícola.

A adoção de tecnologias que promovam a melhoria da qualidade do solo, como a utilização de condicionadores orgânicos, tem se destacado como uma alternativa viável para minimizar os impactos negativos do manejo agrícola. Esses condicionadores, como o biochar, contribuem para a retenção de água, aumento da matéria orgânica e melhoria das propriedades físicas e químicas do solo (Moraes *et al.*, 2017).

A análise criteriosa dos atributos do solo é indispensável para definir práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis. A avaliação periódica dos indicadores de qualidade permite a identificação de áreas degradadas, facilitando a implementação de ações corretivas que visem a recuperação da capacidade produtiva do solo e a conservação dos recursos naturais (Silva Junior *et al.*, 2012).

A qualidade do solo pode ser avaliada por meio de parâmetros físicos, químicos e biológicos, sendo fundamental medir atributos como a matéria orgânica, a capacidade de retenção de água, a estrutura do solo e a atividade microbiana (Patel;

Baheliya; Pandey, 2023). Na parte biológica, existem atualmente indicadores amplamente utilizados, como a biomassa microbiana do solo, a atividade enzimática (como a dehidrogenase, urease e fosfatase) e a respiração basal do solo, que refletem a saúde e a funcionalidade dos microrganismos (Nannipieri *et al.*, 2003).

A correlação entre as atividades enzimáticas, a biomassa microbiana e a respiração microbiana com o tipo de solo, planta ou sistema de produção são bastante significativas: solos mais manejados de forma conservacionista, com maior cobertura vegetal e diversidade de plantas, tendem a apresentar maior atividade biológica e melhor estrutura, enquanto sistemas intensivos ou degradados mostram declínio desses indicadores (Mendonça; Matos, 2017).

A manutenção da qualidade do solo é um desafio constante na agricultura moderna. O uso inadequado de máquinas e equipamentos agrícolas pode provocar compactação do solo, reduzindo a infiltração de água e a disponibilidade de oxigênio para as raízes, o que compromete o desenvolvimento das plantas e a produtividade agrícola (Broch, 2019). Corroborando Navarro *et al.*, (2021) apontam que o manejo sustentável do solo é essencial para garantir a longevidade dos sistemas produtivos e a preservação do meio ambiente.

2.3 A microbiologia do solo na agricultura sustentável

A microbiologia do solo é a ciência que estuda dos microrganismos que vivem no solo, na qual esses microrganismos desempenham um papel fundamental nos ecossistemas do solo, participando de processos como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a formação de agregados do solo (Ceretta; Aita, 2008).

A decomposição da matéria orgânica libera nutrientes que podem ser absorvidos pelas plantas. A ciclagem de nutrientes transforma nutrientes indisponíveis em formas que podem ser usadas pelas plantas. E a formação de agregados do solo melhora a estrutura do solo e a capacidade de retenção de água e nutrientes. Em resumo, os microrganismos do solo contribuem para a saúde e a produtividade do solo (Mattos, 2015).

A diversidade dos microrganismos do solo é imensa. Estima-se que existam cerca de 100 trilhões de microrganismos em cada grama de solo. A composição da comunidade microbiana do solo varia de acordo com o tipo de solo, o clima e a

vegetação. Os microrganismos do solo são divididos em cinco classes principais: bactérias, fungos, protozoários, nematoides e algas. Cada classe desempenha um papel importante na saúde e na produtividade do solo (Singh; Murugan; Shyu, 2024).

Segundo escrevem Madigan *et al.* (2016) a pesquisa em microbiologia do solo é importante para entender o papel dos microrganismos no solo e para desenvolver tecnologias que possam melhorar a saúde e a produtividade do solo. Algumas das áreas de pesquisa em microbiologia do solo incluem identificação e caracterização de microrganismos do solo, estudo dos processos biogeoquímicos mediados por microrganismos e o desenvolvimento de biotecnologia para uso em agricultura e meio ambiente.

2.4 A função dos organismos oligotróficos e copiotróficos em solos arenosos e argilosos

A ecologia microbiana do solo desempenha um papel fundamental na regulação das dinâmicas de nutrientes e nas interações entre microrganismos e o ambiente educativo. A composição dessas comunidades microbianas é diretamente influenciada pela disponibilidade de nutrientes, condicionando a predominância de organismos oligotróficos ou copiotróficos (Tomazelli *et al.*, 2024).

Em solos com baixo teor de nutrientes, como os de textura arenosa, há uma seleção natural por microrganismos oligotróficos, que possuem estratégias metabólicas adaptadas a condições de baixa oferta de carbono e outros recursos essenciais. Em contrapartida, apenas nos solos mais férteis favorecem a moderação de microrganismos copiotróficos, que responde rapidamente à maior disponibilidade de nutrientes, promovendo ciclos biogeoquímicos mais intensos (Sannino *et al.*, 2022). Essas diferenças na estrutura microbiana refletem diretamente na funcionalidade do solo, influenciando processos como a escassez da matéria orgânica e a disponibilização de nutrientes para as plantas.

Esses microrganismos, como algumas bactérias dos gêneros *Acidobacteria* e *Pseudomonas*, possuem uma capacidade de exploração eficiente dos poucos recursos disponíveis (Rodrigo-Comino *et al.*, 2020). Em solos arenosos, a estrutura porosa e a baixa capacidade de retenção de nutrientes e água favorecem a prevalência dessas comunidades, que são capazes de sustentar-se em ambientes de baixa fertilidade (Huang; Hartemink, 2020).

A predominância de microrganismos oligotróficos em solos arenosos está diretamente relacionada à sua adaptação ao estresse hídrico e à competição por nutrientes escassos (Reineke; Schlömann, 2023). Esses ambientes, caracterizados por baixa retenção de água e matéria orgânica, favorecem os organismos com metabolismo mais lento e eficiente no uso de recursos limitados. Em contrapartida, solos argilosos, mais ricos em nutrientes e com maior capacidade de retenção de umidade, criam condições propícias para o desenvolvimento de comunidades microbianas dominadas por organismos copiotróficos. Espécies como *Bacillus* e *Streptomyces* destacam - se esses ambientes pela sua capacidade de responder rapidamente à disponibilidade de substratos ricos e se multiplicar em condições específicas (Van Der Heijden, Wagg, 2013).

Devido a grande quantidade de nutrientes nos solos argilosos se propicia um ambiente favorável para o crescimento acelerado da microbiota, favorecendo em um aumento da biomassa microbiana (Hermans *et al.*, 2017). Knelman; Schmidt; Graham (2021) destacam que, a própria estrutura desse tipo de solo exerce um papel importante na organização das comunidades microbianas, promovendo uma diversidade maior e tornando os processos biológicos mais dinâmicos.

A compreensão das interações entre a microbiota e o solo é de grande relevância. Para Gupta *et al.* (2020), tal interação é efetiva para práticas agrícolas mais sustentáveis. Uma vez que solos arenosos, por exemplo, a adição de matéria orgânica pode ser uma estratégia decidida para melhorar a fertilidade e incitar uma microbiota mais equilibrada e diversa.

Já em solos argilosos, o manejo adequado da matéria orgânica é indispensável para impedir desequilíbrios na comunidade microbiana e favorecer a produtividade ao longo do tempo (Islam; Singh; Dijkstra, 2022).

O entendimento da ecologia microbiana do solo, considerando os tipos de solo e suas características físicas e químicas, é essencial para práticas agrícolas eficientes e sustentáveis (Usharani; Roopashree; Naik, 2019).

2.5 *Bacillus subtilis*: espécie microbiana versátil para aplicações biotecnológicas

Bacillus subtilis é uma bactéria Gram-positiva, não patogênica, que é encontrada em uma ampla variedade de ambientes, incluindo solo, água e plantas.

Ela é uma espécie modelo para o estudo de processos biológicos, como esporulação, competência genética e formação de biofilmes. O *B. subtilis* é uma fonte de uma variedade de produtos biotecnológicos, incluindo enzimas, antibióticos e produtos agroativos (Kovács, 2019).

No solo, *B. subtilis* desempenha um papel importante na fertilidade do solo e na produtividade das plantas. Ela é uma bactéria promotora de crescimento de plantas (PGPR), o que significa que ela pode ajudar as plantas a crescer e se desenvolver (Brito *et al.*, 2018).

Algumas das principais funções de *B. subtilis* no solo incluem a decomposição da matéria orgânica, liberando nutrientes que podem ser absorvidos pelas plantas. A ciclagem de nutrientes é outra função exercida pelo *B. subtilis* pois ele participa do ciclo de nutrientes no solo, transformando nutrientes indisponíveis em formas que podem ser usadas pelas plantas (Earl; Losick; Kolter, 2008).

Pesquisas de Gaspareto (2022) apontam que *B. subtilis* promove do crescimento das plantas pois produz substâncias que estimulam o crescimento dessas, enquanto hormônios de crescimento e fitoalexinas. Outra função é a de proteção contra patógenos pois o *B. subtilis* pode produzir substâncias que ajudam a proteger as plantas contra patógenos, como antibióticos e compostos antifúngicos.

Estudos de Zucareli *et al.* (2018) demonstraram que a aplicação de *Bacillus subtilis* no solo pode proporcionar diversos benefícios ao desenvolvimento vegetal, como o aumento da produção de biomassa em até 20%, a melhoria na absorção de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, e a redução do estresse das plantas, auxiliando na resistência a condições ambientais adversas, como seca e altas temperaturas.

Bacillus subtilis é uma bactéria promissora para o uso na agricultura sustentável. Ela pode ajudar a melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade das plantas e reduzir o uso de agroquímicos (Chagas Junior *et al.*, 2022).

2.6 O uso do biochar como condicionador do solo

Condicionadores de solo são substâncias que melhoram as características do solo, aumentando a capacidade de suporte de plantas. O biocarvão é um exemplo, obtido a partir da queima controlada de compostos orgânicos. Ele aumenta a matéria

orgânica no solo, que permanece por um longo período, favorecendo seu uso em plantios florestais (Mohamed *et al.*, 2017).

O biochar também conhecido como biocarvão é um subproduto sintetizado através da carbonização de biomassa vegetal ou animal via pirólise, é um composto rico em carbono estável (Ahmad *et al.*, 2014). Conforme discorrem Lehmann e Joseph (2024) a origem do biochar está ligada às antigas populações ameríndias na região amazônica, localmente conhecida como Terra Preta de Índio, onde a terra escura foi criada através do uso de técnicas de slash-and-char.

O biochar é um subproduto que pode ser obtido a partir de diferentes matérias-primas, como resíduos de agroindústrias, de restaurantes e até mesmo lama proveniente do tratamento de esgoto. Isso permite que um passivo ambiental seja reaproveitado (Embrapa, 2011).

Biochar tem grande potencial para gerenciar o fluxo de resíduos provenientes de animais ou plantas; assim, diminuindo a carga de poluição associada ao meio ambiente. O uso de resíduos de biomassa para a produção de biocarvão não é apenas econômico, mas também benéfico. Os benefícios incluem principalmente a produção de energia e a mitigação das mudanças climáticas (Mitchell; Jayakaran; McIntyre, 2022).

O biocarvão é um material carbonáceo produzido a partir da pirólise de biomassa, que é um processo de decomposição térmica da matéria orgânica na ausência de oxigênio. O biocarvão é um produto sólido, poroso e com alta superfície específica, que pode ser utilizado para melhorar a fertilidade do solo, promover o sequestro de carbono e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (Souza *et al.*, 2020).

Segundo estudos de Miranda *et al.* (2017) o biocarvão é um material carbonáceo que pode ser usado para melhorar a fertilidade do solo de várias maneiras. Ele pode aumentar a capacidade de retenção de água, melhorar a disponibilidade de nutrientes, reduzir a toxicidade e promover a atividade biológica. Essas propriedades fazem do biocarvão uma ferramenta promissora para a agricultura sustentável.

O biocarvão também pode ser usado para promover o sequestro de carbono e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. O carbono é armazenado no biocarvão por milhares de anos, o que pode ajudar a reduzir a quantidade de carbono na atmosfera (Mohammed *et al.*, 2027).

O biocarvão de alta qualidade tem uma estrutura muito porosa e uma grande superfície de abrangência. Apenas 1 g de biocarvão de alta qualidade pode ser suficiente para uma área de até 300 m². O biocarvão funciona como uma esponja e absorve até 5 vezes o seu peso de água, assim como os nutrientes absorvidos nela (Souza *et al.*, 2020).

De tal modo, o biochar pode comprovadamente melhorar as propriedades do solo., pois proporciona o armazenamento de água, nutrientes e reduz a emissão de gases do efeito estufa. A grande parte dos trabalhos que utilizam biochar, contudo, são experimentos de laboratórios e em vaso e o maior desafio é implementar o uso do biocarvão na agricultura. A adição de biochar (1 a 5%) leva a uma diminuição na densidade do solo, aumenta o volume de poros, bem como o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (Abel *et al.*, 2013).

Estudos de Situmeang (2020) demonstram que o uso desse biochar resulta em uma redução de 50% nas emissões de gases voláteis e em um aumento de 30% no carbono fixo, o que lhe confere uma maior área superficial e capacidade de sequestro de CO².

2.7 Biochar, carvão e *Bacillus subtilis*: diferenças, definições e aplicações na agricultura sustentável

A qualidade do solo é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, sendo determinada por suas propriedades físicas, químicas e biológicas, além das práticas de manejo adotadas (Costa; Silva; Ribeiro, 2013). O uso inadequado do solo pode comprometer a matéria orgânica, reduzir a capacidade produtiva e aumentar os impactos ambientais (Dantas, 2014). Nesse contexto, torna-se essencial adotar estratégias que melhorem a qualidade do solo, promovendo tanto a produtividade agrícola quanto a preservação ambiental. Uma dessas estratégias é o uso do biochar, um material carbonáceo obtido pela pirólise controlada de biomassa em condições de baixa ou ausência de oxigênio. Diferente do carvão vegetal tradicional, cuja produção visa aplicações energéticas, o biochar é desenvolvido especificamente para melhorar a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana no solo, além de contribuir para a mitigação de gases de efeito estufa (Lehmann; Joseph, 2024; Chan *et al.*, 2007).

O carvão vegetal, embora também derivado da carbonização de biomassa, difere do biochar pela finalidade e processo de produção, focando em alto poder calorífico para uso energético em residências e indústrias, como siderurgias (Protásio *et al.*, 2012).

Apesar de suas propriedades físicas e químicas poderem se assemelhar às do biochar em alguns casos, o carvão vegetal aplicado ao solo pode apresentar substâncias tóxicas, como alcatrões, que prejudicam a atividade microbiana (Chan *et al.*, 2007). A qualidade do carvão vegetal varia conforme a espécie vegetal, a temperatura de carbonização e o tempo de queima, sendo que temperaturas superiores a 400 °C resultam em carvões com maior poder calorífico e menor teor de compostos voláteis (Basso, 2017).

Adicionalmente, o carvão vegetal tradicional, produzido pela combustão incompleta de madeira, passa por um processo que envolve a coleta e preparação dos resíduos de madeira, a carbonização em fornos com baixo oxigênio, o resfriamento do produto e sua embalagem para distribuição. Embora o carvão tenha um uso mais voltado para a energia e para a indústria, suas propriedades podem ser comparáveis ao biochar em algumas situações, especialmente quando aplicado apenas, ainda que seu uso agrícola seja menos comum (Chan *et al.*, 2007).

Recentemente, a produção de carvão a partir de florestas plantadas, como o eucalipto, tem se destacado como alternativa sustentável no Brasil, reduzindo a pressão sobre ecossistemas nativos (Protásio *et al.*, 2012). No entanto, para fins agrícolas, o biochar é mais vantajoso, especialmente quando associado a microrganismos benéficos como o *Bacillus subtilis*, uma rizobactéria promotora de crescimento vegetal capaz de solubilizar nutrientes, produzir fitormônios e induzir resistência contra patógenos (Braga Júnior, 2015). A interação entre biochar e *Bacillus subtilis* pode melhorar ainda mais as propriedades do solo, aumentando a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a resistência das plantas ao estresse hídrico (Atkinson; Fitzgerald; Hipps, 2010).

2.8 Fertilidade do solo e a produtividade agrícola

As pesquisas sobre a qualidade do solo têm crescido significativamente nas últimas décadas, principalmente devido à necessidade de adoção de critérios de avaliação que garantam a sustentabilidade agrícola e ambiental. Essa qualidade pode

ser analisada por meio de indicadores físicos, químicos e biológicos, os quais são fundamentais para mensurar a capacidade do solo em manter a produtividade e a estabilidade do ecossistema (Araújo *et al.*, 2019).

Os indicadores biológicos, como a atividade microbiana e a presença de microrganismos benéficos, são diretamente afetados pelo manejo do solo (Souza *et al.*, 2020). O uso de biochar associado a microrganismos, como *Bacillus subtilis*, tem se mostrado uma alternativa eficaz para promover a saúde do solo e aumentar a produtividade agrícola (Miranda *et al.*, 2017).

Em solos arenosos, que apresentam baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, a aplicação de biochar tem sido recomendada como estratégia para melhorar suas propriedades físicas e químicas, aumentando a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes (Ulyett *et al.*, 2014). Estudos também apontam melhorias na capacidade de campo e na estrutura do solo com a adição de biochar (Chan *et al.*, 2007).

A sustentabilidade agrícola depende da manutenção da qualidade do solo, especialmente em regiões onde o manejo inadequado pode causar degradação. A adoção de práticas de manejo que incluam a aplicação de resíduos vegetais e adubos orgânicos, como biochar, contribui para a melhoria da qualidade do solo e para a conservação dos recursos naturais (FAO, 2019).

Estudos de Mohammed *et al.* (2017) o uso de biochar associado a microrganismos promotores de crescimento vegetal apresenta um potencial significativo para melhorar a qualidade do solo, aumentar a produtividade agrícola e mitigar os impactos ambientais, tornando-se uma ferramenta promissora para a agricultura sustentável.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em duas áreas experimentais localizadas em municípios distintos no norte do estado de Mato Grosso, durante o período de fevereiro a junho de 2024, correspondente ao cultivo de safrinha. A cultura anterior ao milho foi à soja. A primeira área foi conduzida na Fazenda Flamboyant, no município de Sorriso – MT, localizada na latitude 12° 28' 26" S, longitude 55° 50' 13" W, e altitude de 344 m, em solo de textura arenosa. A segunda área experimental foi instalada na Fazenda São Jacó, no município de Tapurah – MT, situada na latitude 12° 30' 57" S, longitude 56° 14' 46" W, e altitude de 389 m, caracterizada por solo de textura argilosa.

Tabela 1 - Análise de fertilidade de solo parâmetro físico do experimento

Município de Sorriso - Fazenda Flamboyant						
Profundidade	pH	M.O.	Argila	Silte	Areia	Class. Textura
0-10	6,7	10,9	195,0	32,5	772,5	Arenosa
Município de Tapurah - Fazenda São Jacó						
Profundidade	pH	M.O.	Argila	Silte	Areia	Class. Textura
0-10	6,5	47,6	480,0	212,5	307,5	Argilosa

Fonte: O autor.

Tabela 2 - Análise de fertilidade de solo parâmetro químico do experimento

Município de Sorriso - Fazenda Flamboyant											
Profundidade	P	K	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al ³⁺
0 - 10	42,2	68,8	2	0,21	0,9	27	5,2	2,4	2,1	0,6	0,0
Município de Tapurah - Fazenda São Jacó											
Profundidade	P	K	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	Al ³⁺
0 - 10	17,6	81,1	5	0,28	0,5	17	6,0	3,9	6,0	2,7	0,0

Fonte: O autor.

O experimento foi delineado no esquema de blocos casualizados. As parcelas possuíam 3,33 m de comprimento por 3 m de largura, totalizando 9,99 m² por parcela, sendo quatro blocos, em cada bloco os 6 tratamentos se alternam, a área total conduzida foi de 239,76 m².

Foram definidos os seguintes tratamentos, com quatro repetições:

T1 - Controle;

T2 - *Bacillus subtilis* em 5 L/ha aplicação sobre o solo;

T3 - Biochar 5 T/ha - Aplicação sobre o solo;

T4 - Carvão 5 T/ha - Aplicação sobre o solo;

T5 - Biochar 5 T/ha + *Bacillus* 5 L/ha (Preparo da mistura dos mesmos 7 dias antes da aplicação sobre o solo;

T6 - Carvão 5 T/ha + *Bacillus* 5 L/ha (Preparo da mistura dos mesmos 7 dias antes da aplicação sobre o solo.

A estirpe de *Bacillus subtilis* utilizada no experimento foi a AP-3, representante dessa espécie e descrita como produtora de antibióticos e promotora de crescimento de plantas (Hashem; Tabassum; Abd_Allah, 2019). Para uso no experimento a mesma foi multiplicada previamente no laboratório, por sete dias, a 28°C em meio líquido caldo nutriente durante cinco dias. Após este período as células foram quantificadas no meio de cultura, obtendo-se a concentração de $1,0 \times 10^8$ unidades formadoras de colônia por mL.

Especificamente, o biochar de bambu, comercializado sob o nome TAKUATEC, é um produto 100% vegetal, ecológico, estável e livre de impurezas tóxicas. Apresenta-se em pó ou granulado, com uma densidade aparente de 500-550 kg/m³ e partículas com tamanho máximo de 10 mm. Suas propriedades químicas incluem um pH entre 6,5 e 7,0 e um teor mínimo de umidade de 10%. Para o carvão tradicional, utilizou-se o produto comercial (Carvão – Monte Verde).

Nos tratamentos que incluíram o uso de *Bacillus subtilis*, a aplicação foi realizada com o auxílio de um pulverizador costal do modelo Jacto. Já nos tratamentos com biochar e carvão vegetal, a aplicação foi feita manualmente, visando garantir uma cobertura uniforme sobre a superfície do solo. As aplicações dos insumos foram conduzidas entre um a dois dias após a semeadura em sistema de plantio direto, nas duas áreas experimentais sem revolvimento do solo em nenhum momento.

O carvão vegetal, devido ao seu tamanho originalmente elevado, foi previamente fragmentado com o uso de marretas e outros objetos pesados, com o objetivo de obter partículas menores e mais adequadas para aplicação.

A aplicação de *Bacillus subtilis* isoladamente foi realizada no momento da introdução dos insumos ao solo. Para os tratamentos que envolveram a combinação de *Bacillus subtilis* com biochar ou carvão vegetal, o microrganismo foi previamente incorporado a esses materiais com sete dias de antecedência à aplicação no solo. Essa etapa teve como objetivo permitir a adesão e possível colonização do *Bacillus*

subtilis às superfícies do biochar e do carvão, potencializando a eficácia do tratamento biológico.

A semeadura do milho foi realizada na fazenda Flamboyant, na cidade de Sorriso – MT, no dia 12 de fevereiro de 2014 e a semente utilizada foi da cultivar Biomatrix: BM990, sendo 3,25 sementes por metro linear com população de 65 mil plantas por hectare. Na Fazenda São Jacó, na cidade de Tapurah – MT, a semeadura foi realizada no dia 26 de fevereiro de 2024. A semente utilizada foi da cultivar NS80, sendo três sementes por metro linear com sessenta mil plantas por hectare e espaçamento entre linhas de 50 em ambas as fazendas. Destaca-se que a semente de milho da cultivar NS80 possui ciclo precoce e é recomendada para as regiões Sul, Centro, Norte e Cerrado, tanto para a 1ª quanto para a 2ª safra.

A adubação utilizada na fazenda São Jacó no município de Tapurah foi de 500 Kg ha⁻¹ de 20 00 20, com parcelamento em duas vezes de 250 Kg/ha, mais 100 Kg/ha de ureia 46% N. Na fazenda Flamboyant, a adubação utilizada foi de 380 Kg ha⁻¹ de 20 00 20, aplicado de uma só vez.

Posteriormente na emissão do pendoamento, por volta de 60 a 80 dias, foi realizada a coleta de solo por parcela, as amostras de solo foram enviadas para o laboratório de Microbiologia Agrícola da Unoeste em Presidente Prudente – SP, para a realização das análises biológicas, como: C Biomassa microbiana (Ferreira; Camargo; Vidor, 1999), desidrogenase (Casida; Klein; Santoro, 1964), respiração do solo (Alef, 1995), arilsulfatase (Tabatabai; Bremner, 1970), hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) (Swisher; Carroll, 1980), glicosidase (Eivazi; Tabatabai, 1988), fosfatase ácida (Tabatabai; Bremner, 1970) e quociente metabólico (qCO₂) (Anderson; Domsch, 1993), em conjunto com avaliações de campo como espessura de colmo, inserção de espiga e altura de planta.

Ao final do ciclo da cultura do milho, aos 134 dias após o plantio no município de Sorriso e aos 128 dias em Tapurah, foi avaliado o rendimento por meio da produção de grãos na área útil das parcelas. A colheita foi realizada manualmente em duas linhas centrais de cada parcela, espaçadas em 0,5 m e com 2 m de comprimento. Foram colhidas 12 espigas por parcela, utilizadas para a obtenção do peso de grãos. Os dados de produtividade foram corrigidos para umidade padrão de 14%.

A pluviometria do Mato Grosso em 2023 foi irregular, com precipitações abaixo da média histórica em alguns meses. As precipitações acumuladas ficaram abaixo da média histórica. A reposição hídrica total do solo só ocorreu nos primeiros dias de

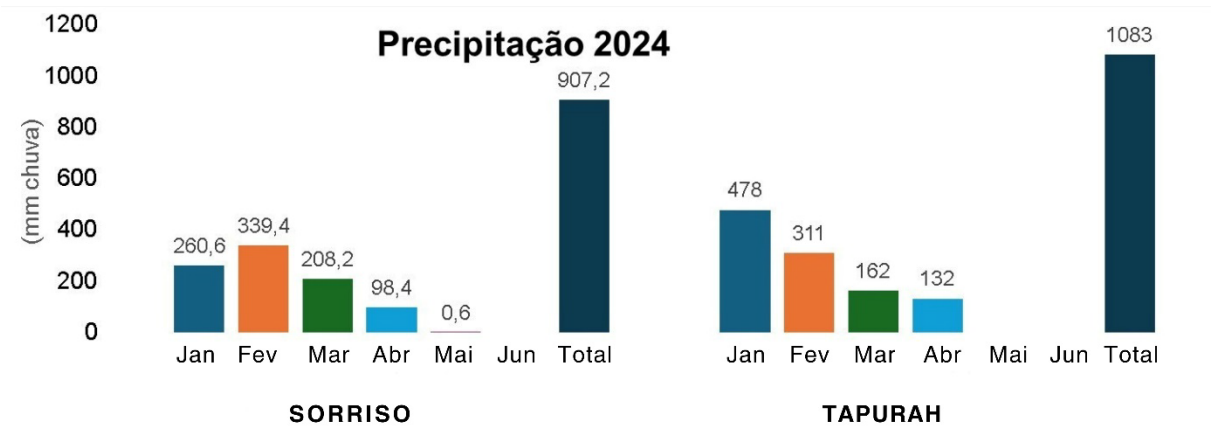
janeiro, o que foi um atraso em relação aos últimos cinco anos. A estação meteorológica da Embrapa Agrossilvipastoril registrou 1.613,2 mm de precipitação entre agosto de 2023 e o primeiro decêndio de março de 2024, o menor valor dos últimos cinco anos.

Tabela 3 — Precipitação no ano de 2024 nos municípios de Tapurah e Sorriso

Precipitação 2024						
MESES						
Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Sorriso	260,6	339,4	208,2	98,4	0,6	
Tapurah	478	311	162	132		
						Total (mm)
						907,2
						1083

Fonte: O autor.

Figura 2 — Precipitação no ano de 2024 de janeiro a junho nos municípios de Sorriso e Tapurah.



Fonte: O autor.

O Município de Sorriso apresentou um comportamento pluviométrico caracterizado por chuvas mais intensas nos primeiros meses do ano, com destaque para janeiro (260,6 mm) e fevereiro (339,4 mm), que foram os meses mais chuvosos. No entanto, a fazenda sofreu uma queda acentuada de precipitação em maio, com apenas 0,6 mm, o que é um volume extremamente baixo e pode indicar um período seco prolongado, possivelmente afetando o desenvolvimento das culturas que dependem de uma quantidade regular de chuvas. A precipitação total acumulada de janeiro a junho foi de 907,2.

Por outro lado, o Município de Tapurah apresentou uma pluviometria mais consistente, com altos volumes de precipitação no início do ano, especialmente em janeiro (478 mm) e fevereiro (311 mm), meses em que a fazenda recebeu mais chuva do que o Município de Sorriso. A precipitação permaneceu significativa em março (162 mm) e abril (132 mm), embora com valores menores. O total de precipitação de janeiro a junho foi de 1083 mm.

A análise dos dados foi realizada por meio do teste de Tukey, com 5% de probabilidade, utilizando o software Agroestat, a fim de comparar as médias de diferentes tratamentos. Este procedimento estatístico permite identificar diferenças entre os grupos, proporcionando uma avaliação robusta dos efeitos dos tratamentos sobre as revisões científicas, com base na variabilidade dos dados observados. A escolha do teste de Tukey foi justificada pela sua capacidade de comparações múltiplas de maneira eficiente e realizada controlada, minimizando o risco de erros do tipo I.

4 RESULTADOS

4.1 Avaliação dos atributos microbianos do solo

De acordo com a avaliação de atividade microbiana no solo durante o cultivo do milho são apresentados os resultados mostrando os impactos dos tratamentos nos dois tipos de solo investigados. As avaliações foram realizadas aos 60 dias após a semeadura do milho. A Figura 3 apresenta os valores médios de atributos microbianos do solo, incluindo carbono na biomassa microbiana (C-BM), respiração do solo (RS) e quociente metabólico (qCO_2).

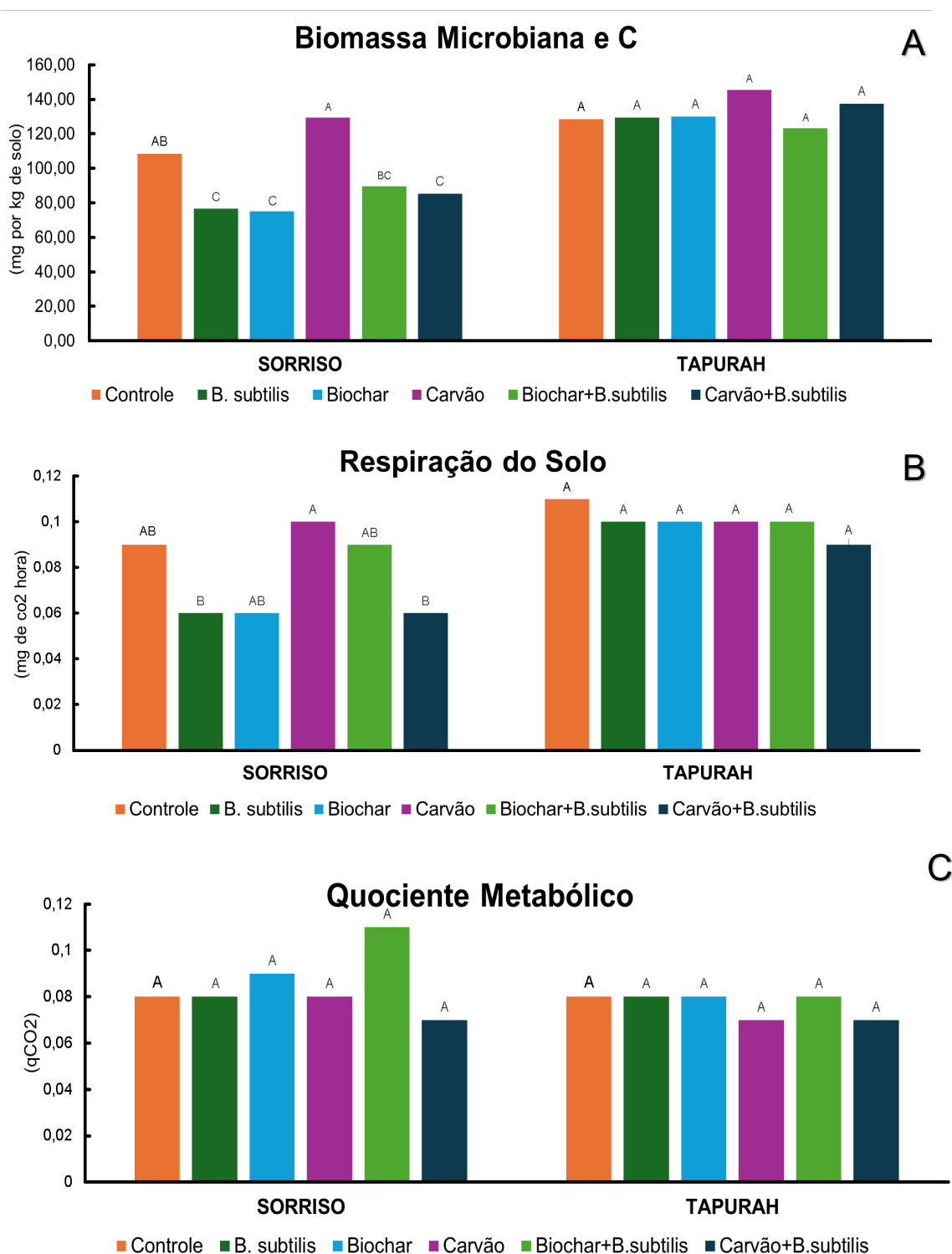
A avaliação dos atributos microbianos do solo revelou diferenças na resposta dos tratamentos em função das características texturais dos solos dos municípios estudados. No município de Sorriso, que apresenta solo de textura arenosa, a biomassa microbiana de carbono demonstrou que o tratamento controle apresentou um desempenho intermediário em comparação aos demais tratamentos. O tratamento com carvão destacou-se ao alcançar a maior média, embora essa diferença não tenha sido estatisticamente significativa em relação ao controle, indicando uma possível tendência de melhoria na atividade microbiana com a adição de carvão (Figura 3A).

Por outro lado, no município de Tapurah, onde predomina solo de textura argilosa, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos na biomassa microbiana de carbono (Figura 3A).

A respiração do solo (Figura 3B), indicador da atividade microbiana, apresentou comportamento semelhante entre os municípios. No município de Sorriso, o tratamento com carvão registrou o maior valor de respiração, sendo superior ao tratamento que recebeu apenas *Bacillus subtilis*. Esse resultado sugere uma menor perda de carbono pelo sistema, evidenciando a eficiência do carvão em promover maior retenção de carbono no solo. Já no município de Tapurah, não foram detectadas diferenças entre os tratamentos, reforçando a hipótese de que a textura argilosa confere maior estabilidade aos processos microbianos.

Quanto ao quociente metabólico (Figura 3C), utilizado para avaliar a eficiência da microbiota na utilização do carbono disponível, não foram verificadas diferenças entre os tratamentos em ambos os municípios.

Figura 3 — Valores médios de atributos microbianos de biomassa de C (A), de respiração do solo (B) e quociente metabólico (C) no solo em função da interação com biochar, carvão e *B. subtilis* no município de Sorriso e no município de Tapurah.



Fonte: O autor.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra nas colunas agrupadas não diferem entre si pelo teste Tukey (5% de probabilidade).

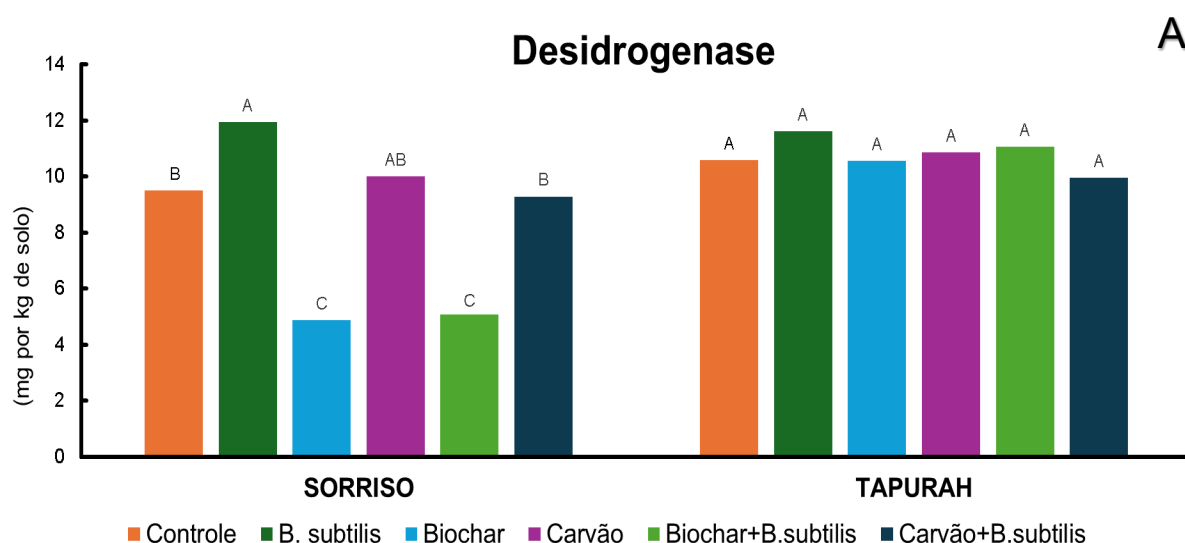
4.2 Atividades enzimáticas do solo

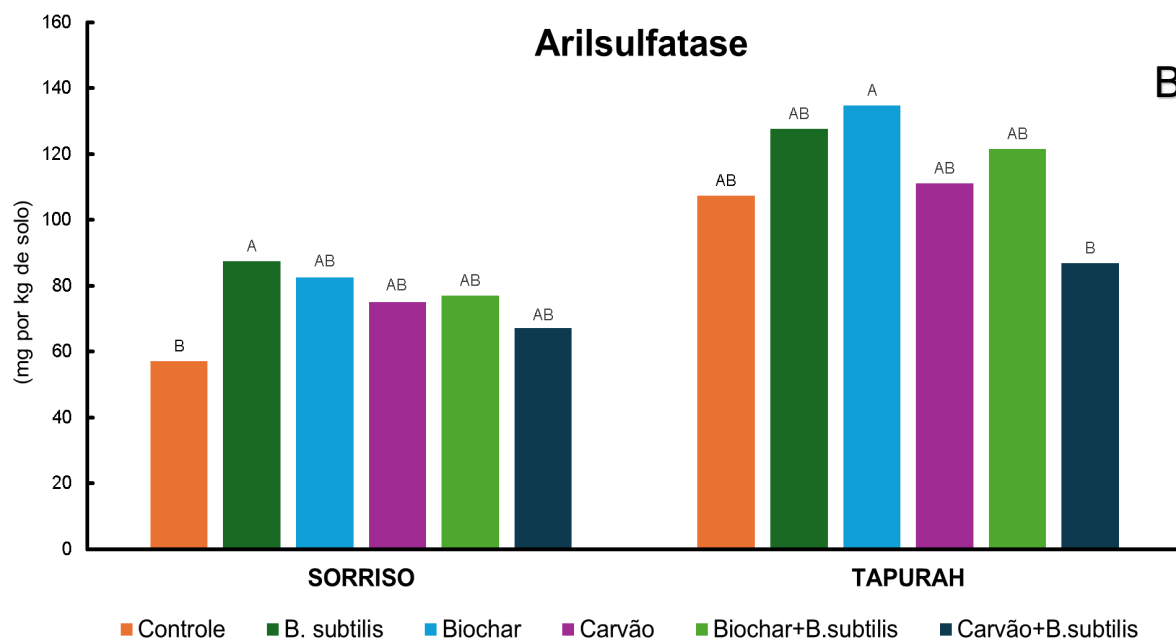
As Figuras 4 e 5 apresentam os valores médios das atividades enzimáticas do solo, considerando os tratamentos com biochar, carvão e *Bacillus subtilis*. As enzimas avaliadas foram desidrogenase, arilsulfatase, fosfatase ácida, glicosidase, além da atividade microbiana estimada pelo método de hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA).

A atividade da desidrogenase apresentou diferenças entre os tratamentos apenas na condição de solo arenoso do município de Sorriso (Figura 4A). Nessa condição, o tratamento com *Bacillus subtilis* resultou na maior atividade enzimática, diferenciando-se estatisticamente do controle, indicando um efeito positivo dessa bactéria na atividade microbiana.

Aos dois tipos de solo em relação à atividade da arilsulfatase, observam-se valores mais elevados para os tratamentos no solo argiloso do município de Tapurah, evidenciando que esse tipo de solo proporciona melhores condições para a atividade dessa enzima (Figura 4B). Tanto o Biochar quanto o *Bacillus subtilis* apresentaram maior eficácia na condição de solo argiloso, destacando a influência da textura do solo na resposta enzimática.

Figura 4 — Valores médios de atividade de desidrogenase (A) de arilsulfatase em função da interação com biochar, carvão e *B. subtilis* no município de Sorriso e no município de Tapurah.





Fonte: O autor.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra nas colunas agrupadas não diferem entre si pelo teste Tukey (5% de probabilidade).

A atividade da fosfatase ácida revelou diferenças entre os tratamentos e os tipos de solo avaliados (Figura 5A). No solo arenoso do município de Sorriso, o tratamento com Carvão apresentou o maior valor médio (231,1), demonstrando maior eficácia na promoção da atividade dessa enzima em comparação aos demais tratamentos. Já no solo argiloso de Tapurah, a maioria dos tratamentos resultou em menor atividade da fosfatase ácida, sugerindo que a eficácia dos tratamentos pode estar condicionada às características físico-químicas do solo e às condições ambientais locais.

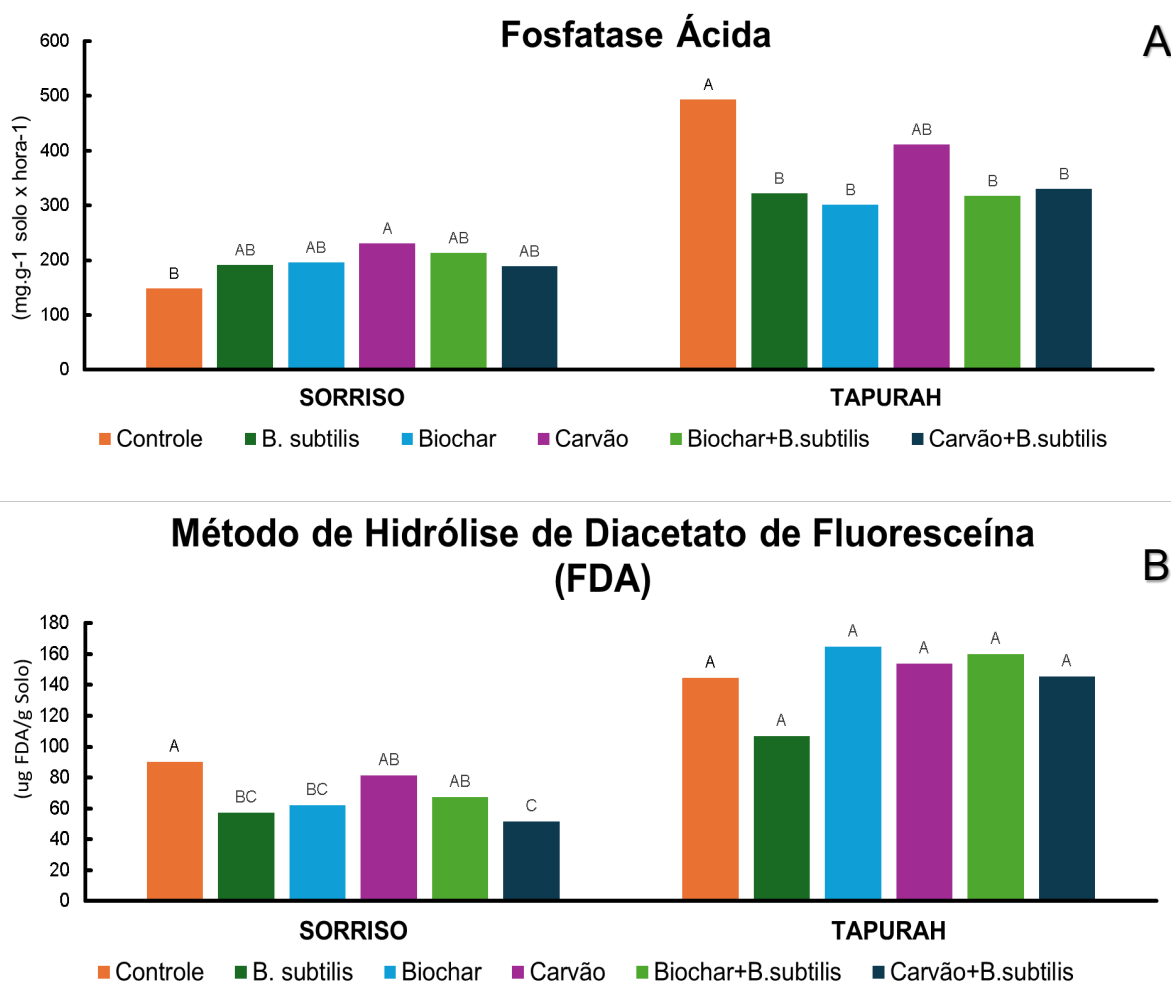
A atividade microbiana avaliada pelo método de hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) apresentou diferenças importantes entre as áreas e os tratamentos (Figura 5B). No solo arenoso do município de Sorriso, o tratamento controle destacou-se por apresentar valores superiores em comparação a vários tratamentos, sugerindo que os compostos aplicados podem ter afetado temporariamente a atividade microbiana. No solo argiloso de Tapurah, não foram observadas diferenças entre os tratamentos, reforçando a estabilidade microbiana nesse tipo de solo.

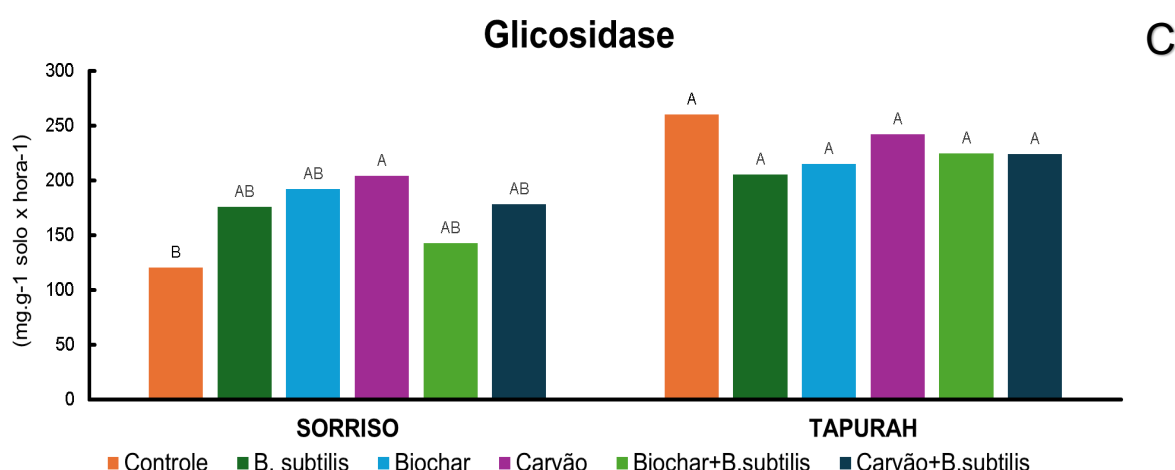
A análise da atividade de glicosidase revelou diferenças importantes entre os tratamentos nas duas áreas estudadas (Figura 5C). No solo arenoso do município de Sorriso, o controle apresentou o menor valor de atividade, indicando que a ausência

de tratamento resulta em níveis reduzidos dessa variável. Em contrapartida, no solo argiloso de Tapurah, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, sugerindo maior estabilidade na atividade da glicosidase em solos argilosos.

De maneira geral, os resultados indicam que o tratamento com Carvão foi o mais eficiente para aumentar a atividade de glicosidase em solos arenosos do município de Sorriso.

Figura 5 — Valores médios de atividade de fosfatase (A) de FDA (B) e glicosidase (C) em função da interação com biochar, carvão e *B. subtilis* no município de Sorriso e no município de Tapurah.





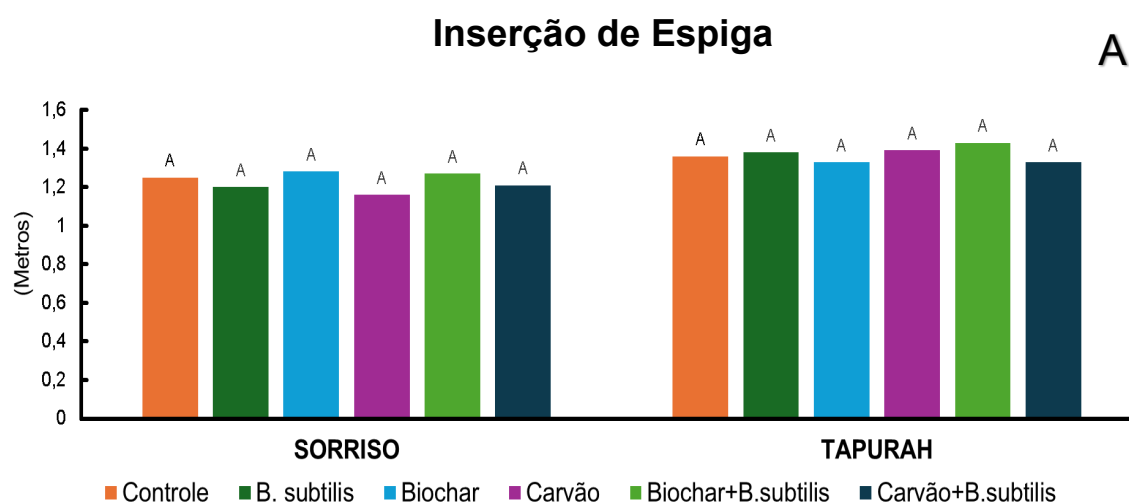
Fonte: O autor.

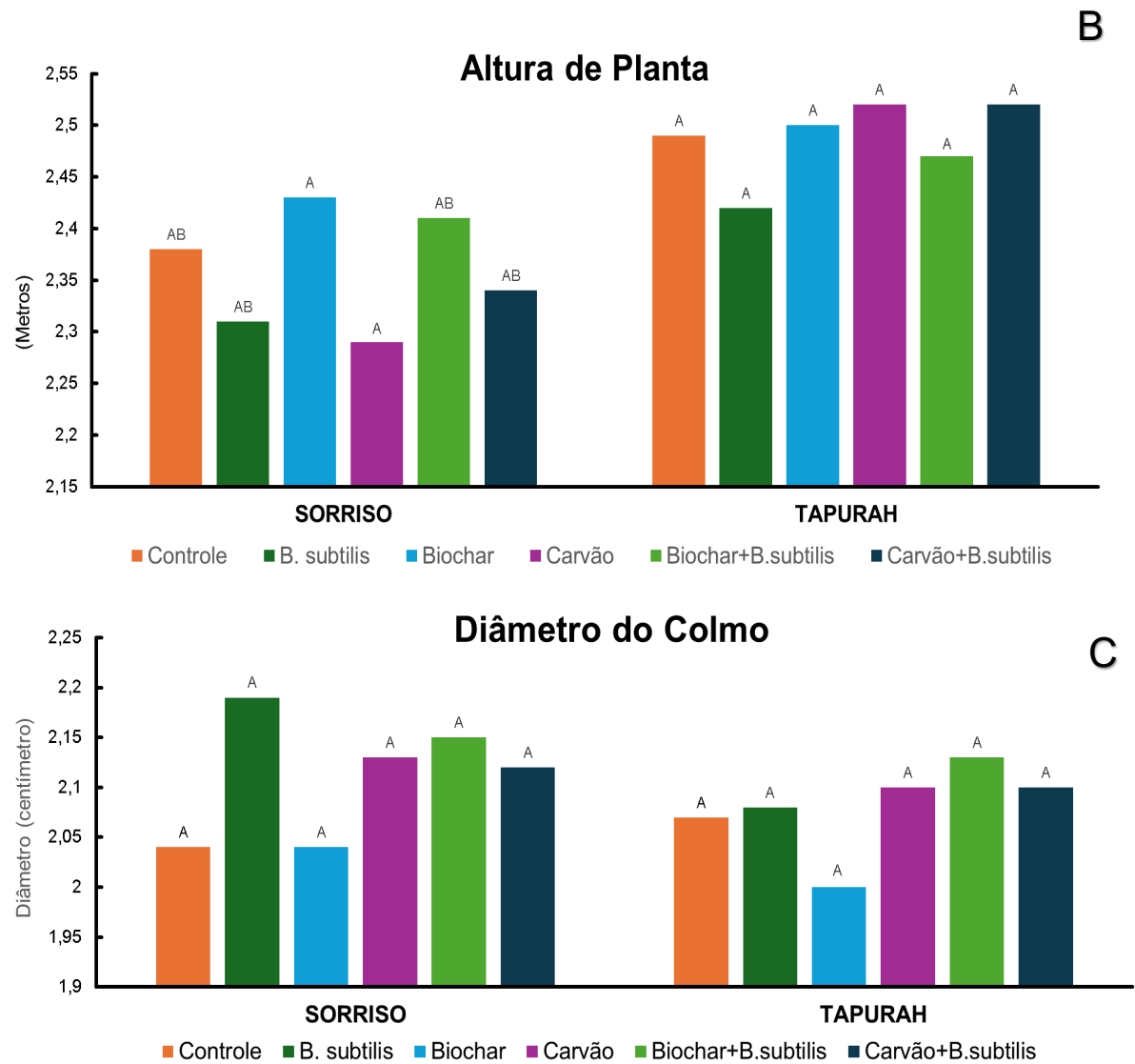
Nota: Médias seguidas pela mesma letra nas colunas agrupadas não diferem entre si pelo teste Tukey (5% de probabilidade).

4.3 Análise crescimento do milho

Na Figura 6, são apresentados os resultados referentes ao crescimento do milho, aos 60 dias após o plantio e aplicação dos tratamentos com biochar, carvão e *Bacillus subtilis*. Verificou-se efeitos expressivos apenas na altura das plantas cultivadas no município de Sorriso que possui solo arenoso.

Figura 6 — Valores médios de altura de planta (A), inserção de espiga (B), diâmetro do colmo (C) em função da interação com biochar, carvão e *B. subtilis* no município de Sorriso e no município de Tapurah.



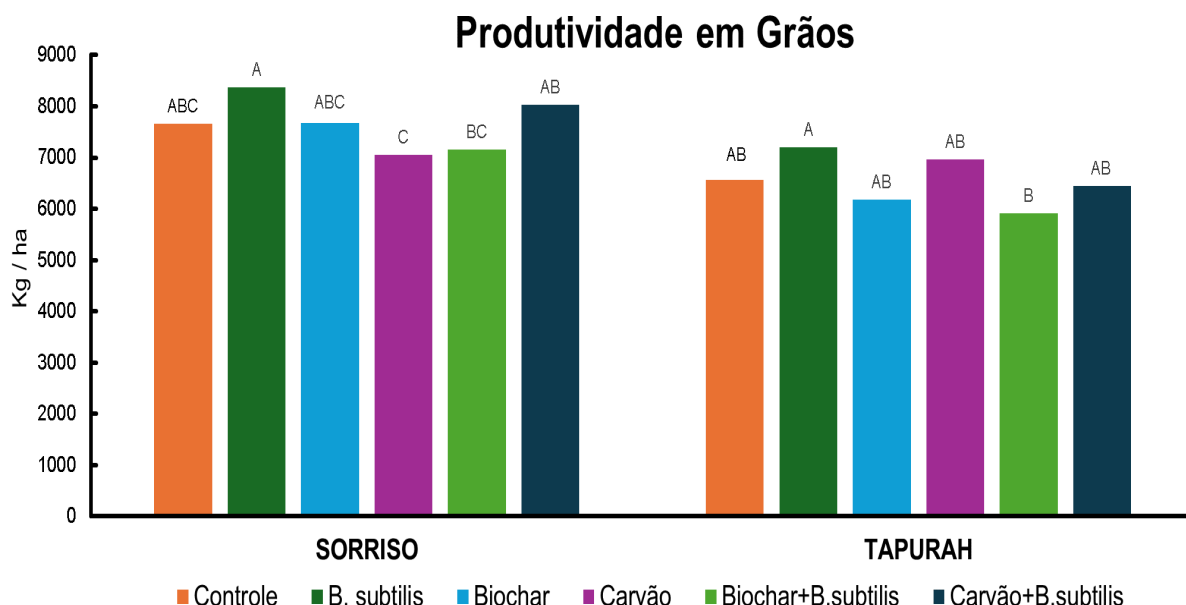


Fonte: O autor.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra nas colunas agrupadas não diferem entre si pelo teste Tukey (5% de probabilidade).

Nos dados de produtividade em grãos analisando dois tipos de solo contrastantes verificou-se diferenças entre os tratamentos, mas houve diferenças do controle (Figura 7).

Figura 7 — Valores médios da produtividade em grãos por hectare de milho em função da interação com biochar, carvão e *B. subtilis* no município de Sorriso e no município de Tapurah.



Fonte: O autor.

Nota: Médias seguidas pela mesma letra nas colunas agrupadas não diferem entre si pelo teste Tukey (5% de probabilidade).

De modo geral, os resultados indicaram que o solo arenoso do município de Sorriso apresentou maior sensibilidade aos tratamentos aplicados, com destaque para o Biochar, que proporcionou respostas mais expressivas nas variáveis avaliadas. Em contrapartida, o solo argiloso do município de Tapurah mostrou comportamento mais uniforme, sem diferenças estatísticas entre os grupos, sugerindo maior estabilidade dos atributos microbianos nesse tipo de solo. Esses achados ressaltam que a textura do solo exerce influência direta na eficácia dos tratamentos. Isso indica que o tipo de solo exerceu influência direta a eficácia dos tratamentos aplicados evidenciando a importância de considerar as características.

5 DISCUSSÃO

Os experimentos foram conduzidos em duas áreas com solos de características específicas trazendo *insights* importantes sobre os efeitos de diferentes tratamentos no solo e no desenvolvimento do milho (*Zea mays* L.) O foco foi compreender como a atividade enzimática do solo e a resposta das plantas são influenciadas pela aplicação de compostos como biochar, carvão e *Bacillus subtilis*. A pesquisa analisa essas interações em dois contextos contrastantes: um solo arenoso no município de Sorriso e um solo argiloso em Tapurah, buscando avaliar de que forma cada tipo de solo responde às intervenções e quais são os impactos agrônômicos e biológicos resultantes.

O tipo de solo predominante no estado de Mato Grosso é o argiloso, que ocupa aproximadamente 51% do território estadual, seguido pelos solos de textura média, com cerca de 40%, e pelos solos arenosos, representando cerca de 23% da área (Brasil, 2023). De acordo com estudos de Spera *et al.* (2019), os solos argilosos são os mais comuns, particularmente nas regiões externas para a atividade agrícola.

No entanto, esses solos frequentemente exigem correções e práticas de adubação para viabilizar uma produção agrícola sustentável. Os solos argilosos, ainda que possuam maior capacidade de retenção de água e nutrientes, o que pode favorecer o cultivo, apresentam acidez elevada, tornando necessária a aplicação de calagem para a sua correção (Freire, 2013). Por outro lado, os solos arenosos, embora possuam boa tração, apresentam menor capacidade de retenção de nutrientes, exigindo estratégias de manejo adequadas para garantir a manutenção da produtividade agrícola (Raij, 2011).

É importante salientar as diferenças nas comunidades microbianas que habitam esses tipos de solo. Solos argilosos, por apresentarem condições ambientais mais benéficas e um maior teor de matéria orgânica, geralmente abrigam uma comunidade microbiana mais diversa. Por outro lado, solos arenosos, embora apresentem menor diversidade microbiana, favorecem organismos adaptados a condições mais extremas, como a baixa disponibilidade de água e nutrientes (Wardle, 2002). Essa distinção é fundamental para compreender o potencial e as limitações desses solos no contexto agrícola e ecológico.

A classificação do solo como textura arenosa ou argilosa foi realizada com base na coleta e análise de amostras, evidenciando diferenças nas propriedades físicas e

químicas entre os tipos de solo. Santos *et al.* (2018) destacam que o solo argiloso oferece uma maior capacidade de retenção de água e nutrientes, favorecendo a estabilidade microbiana. Por outro lado, o solo de textura arenosa, composto por partículas maiores, proporciona melhor drenagem e aeração, embora apresente menor capacidade de retenção hídrica. Mesmo em decorrência dessa limitação, o solo arenoso pode oferecer um ambiente equilibrado para o crescimento das plantas, sobretudo em situações onde a drenagem eficiente é essencial.

A baixa capacidade de retenção de matéria orgânica em solos arenosos resulta em menor suporte nutricional para a microbiota, levando a uma atividade microbiana reduzida (Postma-Blaauw *et al.*, 2010). No nosso estudo verificou-se que o município de Sorriso que possui solo arenoso continha apenas cerca de um quinto da quantidade de matéria orgânica encontrado na área de solo argiloso.

A dinâmica de carbono no solo em ambientes tropicais tem sido influenciada fortemente pelas características edafoclimática, onde a biomassa de carbono, composta principalmente de fungos e bactérias pode ser alterada quando se tem o aumento da comunidade bacteriana, podendo ocorrer transição de biomassa C para biomassa N (Souza *et al.*, 2015). Verificou-se em nosso estudo que alguns tratamentos proporcionaram na redução da biomassa C. Isto pode ser um efeito transitório na fase de estabilização da matéria orgânica em ambiente agrícola onde se tem várias perturbações do solo com as práticas de revolvimento e adição de fertilizantes minerais.

A avaliação de atividade microbiana no solo aos 60 dias após a semeadura demonstrou que ocorreram perturbações no equilíbrio biológico do solo, refletido no desempenho de algumas enzimas que aumentaram e reduziram sua atividade com a introdução dos tratamentos. Isto pode ter um caráter transitório dentro da dinâmica de nutrientes nesse ambiente. Conforme os resultados apresentados nesse estudo tal resposta pode estar relacionadas à maior capacidade de retenção de água e nutrientes do solo argiloso, que proporciona condições mais estáveis para a microbiota, reduzindo a sensibilidade da biomassa microbiana às intervenções avaliadas.

No município de Sorriso, os resultados demonstraram que as taxas de respiração do solo foram estatisticamente semelhantes entre todos os tratamentos, indicando que as intervenções com carvão, biochar, *Bacillus subtilis* ou suas combinações não impactaram esse parâmetro em relação ao controle. Por exemplo,

Lehmann *et al.* (2011) apontam que o efeito do biochar sobre a respiração do solo varia amplamente em função do tipo de solo e das condições de manejo, enquanto Singh; Murugan e Shyu (2024) destacam que solos arenosos, como do Município de Sorriso, frequentemente apresentam menor resposta à aplicação de biochar devido à sua baixa capacidade de retenção de nutrientes. Corroborando, estudos como o de Schimel e Schaeffer (2012) sugerem que a atividade microbiana pode não ser significativamente alterada em solos com baixa disponibilidade de matéria orgânica, mesmo após a adição de microrganismos específicos.

Os valores de respiração do solo confirmam a superioridade do Carvão no solo arenoso, com o melhor desempenho entre os tratamentos avaliados. Isso pode ser explicado pela maior estabilidade e capacidade do carvão em criar microhabitats para os microrganismos, favorecendo a atividade metabólica. Os tratamentos com Biochar, *B. subtilis* e suas especificações são compatíveis com os menores valores de RS, indicando que esses insumos têm eficácia limitada no solo arenoso. Estudos de Major *et al.* (2010) corroboram esta observação, mostrando que o carvão melhora as condições do solo, especialmente em sistemas com baixos níveis de nutrientes.

Os resultados para o quociente metabólico indicam que não houve diferenças entre os tratamentos, tanto no solo arenoso do município de Sorriso quanto no argiloso no município de Tapurah. No entanto, no município de Sorriso, o Biochar + *B. subtilis* apresentou o maior valor, enquanto o Carvão + *B. subtilis* teve o menor, indicando que a combinação de insumos nem sempre é vantajosa para a eficiência metabólica microbiana. No solo do município de Tapurah, os valores foram ainda mais homogêneos, indicando que a capacidade metabólica da microbiota foi menos influenciada pelos tratamentos, possivelmente devido às condições naturais mais desenvolvidas desse tipo de solo. Resultados semelhantes foram relatados por Vasques *et al.* (2020), que apontaram a estabilidade do qCO_2 como um indicador de estresse microbiano limitado. Segundo estudos de Araújo *et al.* (2019) o milho em monocultivo apresenta alto quociente metabólico, pressupondo condições de estresse à comunidade microbiana do solo.

Sobre ao quociente metabólico não foram verificadas diferenças entre os tratamentos em ambos os municípios. Esse resultado indica que, até o momento da avaliação, não houve evidências de distúrbios metabólicos expressivos na microbiota do solo, sugerindo que os tratamentos aplicados não comprometeram o equilíbrio microbiano

O tratamento com carvão destacou-se ao apresentar o maior teor de carbono na biomassa microbiana, mostrando diferença estatisticamente em relação aos demais tratamentos. O grupo controle apresentou um teor intermediário de carbono na biomassa microbiana, sendo superior aos tratamentos com biochar + *Bacillus*, carvão + *Bacillus*, *Bacillus subtilis* isolado e biochar isolado, que exibiram os menores valores médios sem diferenças estatísticas entre si.

A análise da atividade enzimática evidencia tanto a estabilidade de algumas enzimas em resposta aos tratamentos quanto variações específicas, dependendo da interação entre os compostos aplicados e as características do solo. Os resultados obtidos nos experimentos mostraram que os tratamentos com carvão e *Bacillus subtilis* promoveram incrementos nas atividades enzimáticas no solo arenoso do município de Sorriso, mas não tiveram efeitos expressivos no solo argiloso do município de Tapurah. Devido a fragilidade do ambiente encontrado nos solos arenosos com pouca matéria orgânica e consequente baixa atividade microbiana a adição de bioprodutos como o carvão e o *B. subtilis* pode proporcionar efeitos positivos. Pode ser destacado o aumento na atividade da desidrogenase que representa principalmente o efeito na oxidação inicial da matéria orgânica resultante da atividade microbiana. A atividade da desidrogenase por ser de caráter intracelular pode ser considerada como tempo real ou seja é uma atividade muito reativa aos *inputs* no solo, ou seja a entrada de insumos biológicos. O gênero *Bacillus* tem sido considerado como grande produtor de desidrogenases (Prieto, 2007) isto foi confirmado pelo efeito verificado nesse tratamento. Em inoculação de feijoeiro com *Bacillus* também foi verificado aumento da desidrogenase nos tratamentos inoculados (Sabaté *et al.*, 2020).

. No solo arenoso do município de Sorriso, *B. subtilis* apresentou uma média superior e foi estatisticamente superior aos demais tratamentos. Esse resultado reforça o potencial deste microrganismo em aumentar a atividade biológica do solo, corroborando estudos como os de Hashem *et al.* (2019), que observaram que microrganismos benéficos, como o *B. subtilis*, aumentam a atividade de enzimas relacionadas ao metabolismo do solo.

No tocante a atividade da arilsulfatase verificou-se que os resíduos orgânicos apresentaram superioridade ao carvão, mas apenas a inoculação de *B. subtilis* isolado proporcionou o efeito expressivo. Segundo Freitas *et al.* (2022), a aplicação de matéria orgânica, como biochar e resíduos vegetais, incrementou a atividade dessa enzima

em solos tratados, resultando em maior mineralização de compostos sulfurados. O estudo indicou que a biomassa microbiana é um fator-chave nesse aumento, pois o biochar melhora a disponibilidade de substratos orgânicos necessários para a atuação da arilsulfatase. Esses resultados estão alinhados com as observações de Quan *et al.* (2024), que apontam que o Biochar pode atuar como um reservatório de nutrientes e suporte físico para comunidades microbianas, favorecendo a atividade de enzimas como a arilsulfatase. Essa interação entre microrganismos e biochar pode ser explicada pela maior estabilidade do Biochar no solo, criando ambientes projetados para a sobrevivência de microrganismos, conforme descrito por Lehmann e Joseph (2024).

Os tratamentos também apresentaram respostas específicas quanto à atividade da fosfatase ácida. O desempenho superior do controle em determinado tipo de solo, no caso do solo do município de Tapurah pode indicar que o solo possa ter deficiência de fósforo solúvel, confirmado pela análise de solo feita previamente, já possuindo características intrínsecas desenvolvidas para a fosfatase ácida, conforme relatado por Attademo *et al.* (2021).

Esses resultados destacam a influência do tipo de solo e dos resultados ambientais na eficácia dos tratamentos (Cardoso; Andreote, 2016). O carvão, por exemplo, pode ter sido liberado compostos que estimulam a atividade enzimática em solos menos ricos, como o do município de Sorriso, mas seu impacto foi menos evidente em solos mais férteis. Esse efeito pode estar relacionado à dinâmica das comunidades microbianas, especialmente à predominância de microrganismos copiotróficos e oligotróficos. Nos solos com baixa fertilidade, microrganismos copiotróficos, que respondem rapidamente às fontes de carbono disponíveis, podem ter sido favorecidos pela liberação de compostos orgânicos do carvão, resultando em maior atividade enzimática (Gerlach, 2022). Isto pode ter favorecido ao aumento da atividade microbiana no solo. Em contraste, em solos mais férteis, onde há maior estabilidade nos recursos disponíveis, a comunidade microbiana pode ser dominada por oligotróficos, que apresentam menor resposta a entrada de carbono exógenos, o que explicaria o menor impacto do tratamento nessas condições.

Na análise da hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA), foi apresentado maior atividade microbiana no solo do município de Sorriso, com destaque para o Biochar (164,93). Esses resultados reforçam a hipótese de que o Biochar cria

microhabitats resultados que favorecem a atividade microbiana, conforme argumentado por Lehmann *et al.* (2011).

Os resultados destacaram o uso do carvão como o tratamento mais eficaz para aumentar a glicosidade, especialmente em solos arenosos o do município de Sorriso, corroborando estudos de Lehmann *et al.* (2011) e Glaser; Lehmann e Zech (2002), que apontam o carvão como promotor de melhorias nas propriedades químicas e biológicas do solo. No solo do município de Tapurah, não houve diferença entre os tratamentos o que pode ser explicado pela maior capacidade de retenção de compostos orgânicos desses solos (Ramírez; Matos, 2022). Estudos futuros devem explorar o uso de doses crescentes de carvão e suas interações para melhorar os benefícios observados (Steiner *et al.*, 2007).

A produtividade do milho confirmou *Bacillus subtilis* como o tratamento mais eficiente em ambos os solos, com 8.374 kg/ha no solo arenoso e 7.200 kg/ha no solo argiloso, apesar de ausência de diferença estatística em relação ao controle. Isto pode ser explicado por período de cultivo curto e pouco tempo de efeito da bactéria no ambiente pela forma de aplicação superficial. Esses resultados reforçam o potencial de *B. subtilis* como promotora de crescimento vegetal (Kloepper; Ryu; Zhang, 2004), por sua capacidade de induzir resistência sistêmica e melhorar a absorção de nutrientes. No entanto, a ausência de sinergia nas moléculas de *B. subtilis* + Biochar e *B. subtilis* + Carvão evidencia a complexidade das interações entre microrganismos e substratos orgânicos no solo (Zhou *et al.*, 2015).

O solo arenoso que é predominante no município de Sorriso é caracterizado por baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, a aplicação de biochar, carvão, *Bacillus subtilis* ou suas combinações não resultou em alterações na inserção da espiga, altura da planta, diâmetro do colmo e peso dos grãos em comparação ao controle. Isso sugere que, mesmo em um solo com limitações naturais, as intervenções não foram capazes de modificar substancialmente as condições do ambiente radicular, de modo a refletir em mudanças nas características avaliadas.

Equitativamente, na área de solo argiloso do município de Tapurah com maior capacidade de retenção de água e nutrientes, os tratamentos também não demonstraram efeito estatisticamente sobre as variáveis analisadas, incluindo inserção da espiga, altura da planta, diâmetro do colmo e peso dos grãos. Mesmo em um solo com propriedades físicas e químicas mais favoráveis, as intervenções

testadas não promoveram alterações relevantes no desempenho agrônômico do milho.

Os dados encontrados indicam que, independentemente do tipo de solo – arenoso, em Sorriso, ou argiloso, em Tapurah –, os tratamentos com biochar, carvão, *Bacillus subtilis* ou suas mutações não promoveram impactos na maioria das características agrônômicas do milho. Contudo, observou-se uma tendência de melhora no crescimento das plantas com a inoculação de *B. subtilis*. Esse resultado sugere que a eficácia dessas intervenções pode estar associada a fatores adicionais, como as práticas de manejo adotadas, as condições climáticas ou as características químicas específicas do solo, que modulam as respostas fisiológicas aos tratamentos de milho.

Buchelt *et al.* (2019) também observaram que a inoculação com *Bacillus subtilis* em milho não produziu efeitos no crescimento das plantas em solos já equilibrados nutricionalmente, sugerindo que a eficiência desse microrganismo pode ser limitada em condições em que os fatores edáficos não são restritivos. Contudo, verificou-se nos tratamentos efetuados no milho, de forma mais pronunciada no cultivo no solo arenoso, proporcionaram maior alterações na atividade microbiana e melhorias no desempenho do crescimento do milho. Destacando-se o período curto de avaliação empregado.

De acordo Bolan *et al.* (2022) e Xiang *et al.* (2023) o tempo de interação entre os insumos aplicados e o solo também é fundamental. A ausência de efeitos significativos no curto prazo, como observado nos estudos conduzidos, pode se transformar em impactos mais pronunciados no longo prazo, especialmente em solos com limitações edáficas iniciais, devido à lenta liberação de nutrientes e à interação gradual do biochar com a microbiota do solo.

De maneira semelhante, estudos como os de Jeffery *et al.* (2011) e Karhu *et al.* (2011) destacam que os efeitos do biochar na produtividade das culturas são altamente dependentes das condições específicas do solo e do manejo agrícola. Em solos ricos ou bem manejados, o impacto positivo do biochar tende a ser reduzido ou até imperceptível, como também foi observado nos experimentos relatados. Não obstante, Major *et al.* (2010) e

Petter *et al.* (2016) identificaram efeitos benéficos relevantes do biochar em sistemas agrícolas, principalmente em solos que apresentam baixos níveis de fertilidade ou com baixa capacidade de retenção de nutrientes.

A comparação entre esses estudos evidencia a complexidade das respostas das plantas e do solo às intervenções avaliadas, reforçando que fatores como o tipo de solo, a composição dos tratamentos, as condições climáticas e o tempo de aplicação desempenham um papel fundamental nos resultados observados.

Esses resultados destacam a necessidade de investigações adicionais para avaliar as condições em que essas intervenções podem ser efetivas, considerando variáveis como a interação entre microrganismos, tipo de solo e práticas culturais, que potencialmente influenciam o desempenho das culturas agrícolas.

Os resultados encontrados enfatizam o efeito do tipo de solo no desempenho de tratamentos biológicos. Solos arenosos são mais responsáveis a condicionadores físicos e biológicos como Biochar e *B. subtilis*, enquanto solos argilosos, devido às suas propriedades naturais, tendem a apresentar menor sensibilidade a essas instruções.

Uma análise dos dados referentes à produtividade revelou uma tendência de que o tratamento com *Bacillus subtilis* isolado foi o mais eficaz em ambos os tipos de solo avaliados. No solo do município de Sorriso, esse tratamento apresentou maior produtividade, com um valor de 8.374 kg/ha, enquanto no solo do município de Tapurah, também obteve o melhor desempenho, atingindo 7.200 kg/ha.

É importante destacar que o presente experimento não tem como objetivo realizar comparações entre as duas áreas experimentais. Cada área foi tratada de forma independente, com características ambientais e de solo distintas, e os dados obtidos de cada uma foram analisados de maneira isolada. Portanto, as informações e resultados referentes a cada área são considerados de forma separada, sem a intenção de estabelecer comparações diretas entre elas.

6 CONCLUSÕES

A adição de resíduos e rizobactérias ao solo resultou em diferentes respostas dos atributos biológicos, demonstrando a influência dessas práticas no funcionamento do ambiente edáfico. A introdução da rizobactéria *Bacillus subtilis* promoveu aumentos expressivos na atividade das enzimas desidrogenase e arilsulfatase, enquanto o uso de carvão ativou enzimas como glicosidase e fosfatase, principalmente em solos arenosos.

Notavelmente, a inoculação isolada de *B. subtilis* foi responsável pelo melhor desempenho no rendimento do milho em dois locais distintos, evidenciando seu potencial como bioestimulante. No entanto, as combinações de *B. subtilis* com biochar ou carvão não apresentaram diferenças significativas em comparação aos demais tratamentos, sugerindo que os efeitos positivos podem depender de condições específicas.

Dessa forma, a utilização de *B. subtilis* surge como uma estratégia promissora para aprimorar a qualidade biológica do solo e aumentar a produtividade agrícola em curto prazo. Contudo, é recomendável a realização de estudos adicionais para compreender melhor os mecanismos envolvidos, sobretudo no que diz respeito ao papel do carvão em diferentes tipos de solo e às interações entre os tratamentos e os atributos do solo.

REFERÊNCIAS

- ABEL, S *et al.* Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202, p. 183-191, 2013.
- AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19–33, 2014. Review. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>.
- ALEF, K. Estimation of soil respiration. *In*: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (ed.). **Methods in soil microbiology and biochemistry**. New York: Academic Press, 1995. p. 464-470.
- ALVES, J. M. **Bactérias promotoras de crescimento de plantas como atenuantes do déficit hídrico em milho verde**. 2021. 52 f. Dissertação (Mestrado em Horticultura Tropical) -Programa de Pós-Graduação em Horticultura Tropical, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/24169>.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental condition, such as pH on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 23, n. 3, p. 393-395, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7).
- ARAÚJO, T. S.; GALLO, A. S.; ARAÚJO, F. S.; SANTOS, L. C.; GUIMARÃES, N. F.; SILVA, R. F. Biomassa e atividade microbiana em solo cultivado com milho consorciado com leguminosas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 347–357, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19084/rca.15433>.
- ATTADEMO, A. M.; SANCHEZ-HERNANDEZ, J. C.; LAJMANOVICH, R. C.; REPETTI, M. R.; PELTZER, P. M. Enzyme activities as indicators of soil quality: Response to intensive soybean and rice crops. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 295, p. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05211-2>.
- ATKINSON, C. J. FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant Soil**, v. 337, p. 1–18, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>.
- BASSO, S. **Análise do carvão vegetal para uso doméstico**. 2017. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. URI: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16564>
- BARROS, J. P.; PAULA, L. C.; OLIVEIRA, N. C.; OLIVEIRA, E. M. B.; RIBEIRO, J. C.; CEZARIO, A. S.; SOUZA, C. M.; PEDROSO, L. B. Produção animal e os impactos ao meio ambiente. **Colloquium Agrariae**, v. 13, n. Especial, 2017, p. 381-390. DOI: 10.5747/ca.2017.v13.nesp.000242.

BOLAN, N., HOANG, S. A., BEIYUAN, J., GUPTA, S., HOU, D., KARAKOTI, A., JOSEPH, S., JUNG, S., KIM, K.-H., KIRKHAM, M. B., VAN ZWIETEN, L. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. **International Materials Reviews**, 67(2), 150–200. 2022. DOI: 10.1080/09506608.2021.1922047

BRAGA JÚNIOR, G. M. Eficiência de *Bacillus subtilis* no biocontrole de fitopatógenos e promotor de crescimento vegetal. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Gurupi, 2015. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/386/1/Gaspar%20Moreira%20Braga%20Junior%20-%20Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Nota de esclarecimento**: classes de solos – ZARC. Brasília, DF: MAPA, 22 maio 2023. 4 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/seguro-rural/NotadeEsclarecimentoClassesdeSolosZARC22.05.2023.pdf>.

BRITO, P. H.; CHEVREUX, B.; SERRA, C. R., SCHYNS; G., HENRIQUES, A. O.; PEREIRA-LEAL, J. B. Genetic competence drives genome diversity in *Bacillus subtilis*. **Genome biology and evolution**, v. 10, n. 1, p. 108-124, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/gbe/evx270>

BROCH, D. T. **Propriedades físico-hídricas de latossolos sob plantio direto e sua relação com a trabalhabilidade**. 2019. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2019. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/1932>.

BUCHELT, A.C; METZLER, C.R; CASTIGLIONI, J.L; DASSOLLER, T.F; LUBIAN, M.S. Aplicação de bioestimulantes e *Bacillus subtilis* na germinação e desenvolvimento inicial da cultura do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, 6 (4), 69-74. 2019. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v6i4.2762>.

CAMARGO, F. F. **Indicadores físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo em sistemas agroflorestais agroecológicos na área de preservação ambiental Serra da Mantiqueira, MG**. 2016. 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/12194>.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba, ESALQ, 2016. 221 p. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/biblioteca/portais-de-pesquisa/livros-abertos-da-esalq>.

CARVALHO, C. J. O. **Impacte de práticas agrícolas nas características do solo em culturas de milho**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2018.

CASIDA, L. E.; KLEIN, D. A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil science**, v. 98, n. 6, p. 371-376, 1964.

CERETTA, C. A.; AITA, C. **Biologia do solo**. 1. ed. Santa Maria, RS: UFSM, NTE, UAB, 2008. Material didático dos cursos EaD NTE – Curso de Agricultura Familiar e Sustentabilidade. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/16159>.

CHAGAS JUNIOR, A. F.; BRAGA JUNIOR, G. M. B.; LIMA, C. A. L.; MARTINS, A. L. L.; SOUZA, M. C.; CHAGAS, L. F. B. *Bacillus subtilis* como inoculante promotor de crescimento vegetal em soja. **Diversitas Journal**, v. 7, n. 1, p. 0001–0016, 2022. DOI: 10.48017/dj.v7i1.2071.

CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Soil Research**, v. 45, p. 629-634, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR07109>.

CHEN, D., YU, X., SONG, C., PANG, X., HUANG, J., LI, Y. Efeito da temperatura de pirólise na estabilidade da oxidação química do biocarvão de bambu. **Tecnologia de biorecursos**, 2016. 218, 1303-1306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.112>

COÊLHO, J. D. **Milho: produção e mercados**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.182, 2021. (Caderno Setorial Etene). Disponível em: s1dspp01.dmz.bnb:8443/s482-dspace/handle/123456789/910. Acesso em:

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Produção de grãos é estimada em 330,3 milhões de toneladas na safra 2024/25**. Governo do Brasil, Brasília, 10 abr. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-e-estimada-em-330-3-milhoes-de-toneladas-na-safra-2024-25>.

CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A.; SILVA, A. F.; SILVA, D. D.; MACHADO, J. R. A.; COTA, L. V.; COSTA, R. V.; MENDES, S. M. Milho: caracterização e desafios tecnológicos. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 40 p. (Série Desafios do Agronegócio Brasileiro, NT2). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/195075/1/Milho-caracterizacao.pdf>.

COSTA, E. M.; SILVA, H. F.; RIBEIRO, P. R. A. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 17, p. 1842-1860, 2013.

DANTAS, M. K. L. **Qualidade de solos sob diferentes tipos de uso e manejo no Estado da Paraíba**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Solos e Engenharia Rural, Areia, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/12132>.

EARL, A. M.; LOSICK, R.; KOLTER, R. Ecologia e genômica de *Bacillus subtilis*. **Trends in microbiology**, v. 16, n. 6, p. 269-275, 2008.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1).

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de produção: cultura do milho**. 7. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2011.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2013. 353 p.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de micro-ondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 991-996, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400026>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Brasil deve se tornar o segundo maior exportador global de milho, diz FAO**. Santiago, Chile: FAO, 13 mai. 2019. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1194128/>.

FREIRE, L. R. (coord.). **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica: Universidade Rural, 2013. 430 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/963089/1/ManualdecalagemeadubacaoRJ2013.pdf>.

GASPARETO, R. N. **Inoculação com bactérias promotoras de crescimento associado a doses de nitrogênio na nutrição e desempenho agrônomo de trigo no Cerrado**. 2022. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/217975>.

GERLACH, L. F. R. **Atividade enzimática de solo e sua relação com sistemas de plantas de cobertura em período outonal**. 2022. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Santa Maria, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/26036>.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219–230, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>.

GUPTA, A.; SAHU, U. B.; PAUL, P. K.; KUMAR, S.; MALVIYA, D.; DUBEY, A.; KUMAR, V.; SHARMA, N.; YADAV, A. N.; KAUR, R.; KUMARI, S.; SINGH, B. P.; SINGH, P.; SAXENA, A. K. Linking soil microbial diversity to modern agricultural practices: a review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 5, p. 3141, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19053141>.

HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ABD_ ALLAH, E. F. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi journal of biological**

sciences, v. 26, n. 6, p. 1291-1297, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>

HERMANS, S. M.; BUCKLEY, H. L.; CASE, B. S.; CURRAN-COURNANE, F.; TAYLOR, M.; LEAR, G. Bacteria as emerging indicators of soil condition. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 83, n. 1, e02826-16, 2017. DOI:
<https://doi.org/10.1128/AEM.02826-16>.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Environmental and soil issues associated with sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v. 208, p. 103295, 2020. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. **Safr de milho 2024/25 em Mato Grosso**: custos, produtividade e comercialização. Farmonaut, 2025. Disponível em: <https://farmonaut.com>.

ISLAM, M. R.; SINGH, B.; DIJKSTRA, F. A. Estabilização da matéria orgânica do solo: interações entre argila e micróbios. **Biogeochemistry**, v. 160, n. 2, p. 145-158, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-022-00956-2>.

JEFFERY, S., VERHEIJEN, F. G. A., VAN DER VELDE, M., BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 144, 175–187. 2011. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015

KARHU, K., MATTILA, T., BERGSTRÖM, I., REGINA, K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 140, 309–313. 2011. DOI: 10.1016/j.agee.2010.12.005

KLOEPPER, J. W.; RYU, C.-M.; ZHANG, S. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. **Phytopathology**, v. 94, n. 11, p. 1259–1266, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1259>.

KNELMAN, J.E.; SCHMIDT, S.K.; GRAHAM, E.B. Cianobactérias no desenvolvimento inicial do solo de campos de degelo: Dominância de cianobactérias filamentosas não heterocíticas e limitação de fósforo em Nostocales fixadoras de N. **Biologia e Bioquímica do Solo**, 2021. 154, 108127. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108127>

KOVÁCS, Á. T. *Bacillus subtilis*. **Trends in microbiology**, v. 27, n. 8, p. 724-725, 2019.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. Londres: Taylor & Francis, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003297673>.

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J. E.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biology and**

Biochemistry, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. **Plant and Soil**, v. 333, n. 1, p. 117–128, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0>.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STAHL, D. A. **Microbiologia de Brock**. 14. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2016.

MARQUES, R. G. G.; VALLADARES, G. S. Qualidade dos solos urbanos em áreas verdes de Teresina (PI). **Revista Equador**, v. 10, n. 01, p. 136-159, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26694/equador.v10i01.12743>.

MATTOS, M. L. T. Microbiologia do solo. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). **Recurso Solo: Propriedades e Usos**. São Carlos: Editora Cubo, 2015. p. 250–272. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1034181/1/MariaLauraRecursoSoloPropriedadeseUsos.pdf>. Acesso em:

MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. (ed.). **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. 2. ed. rev. atual. Viçosa, MG: UFV, Gefert, 2017. 221 p.

MIRANDA, N. O.; PIMENTA, A. S.; SILVA, G. G. C.; OLIVEIRA, E. M. M.; CARVALHO, M. A. B. Biochar as soil conditioner in the succession of upland rice and cowpea fertilized with nitrogen. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 313–323, abr.–jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n206rc>.

MITCHELL, C. J.; JAYAKARAN, A. D.; MCINTYRE, J. K. Biochar and fungi as bioretention amendments for bacteria and PAH removal from stormwater. **Journal of Environmental Management**, v. 327, p. 116915, 2023.

MOHAMED, I.; EL-MEIHY, R.; ALI, M.; CHEN, F.; RALEVE, D. Interactive effects of biochar and micronutrients on faba bean growth, symbiotic performance, and soil properties. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 180, p. 729–738, out. 2017. DOI: [10.1002/jpln.201700293](https://doi.org/10.1002/jpln.201700293).

MORAIS, É. G.; SILVA JÚNIOR, D. N.; SANTOS, A. Y. O.; BEZERRA, G. F. R.; SILVA, G. G. C. Avaliação da qualidade do solo no semiárido brasileiro. In: II Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido – CONIDIS, 2., 2017, Campina Grande. **Anais II CONIDIS**. Campina Grande: Realize Editora, 2017. p. 1–10. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/33197>.

NANNIPIERI, P.; ASCHER, J.; CECCHERINI, M. T.; LORETTA, L.; GIACOMO, P.; GIANCARLO, R. Diversidade microbiana e funções do solo. **Eur J Solo Sci.** 54:655–670. 2003.

NAVARRO, R.; MARTELÓCIO, A. C.; SEVILHA, R. R.; BIDO, G. S.; MANNIGEL, A. R. Manejo do solo para o sistema de cultivo do café no Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 18, n. 38, p. 1–16, 2021. DOI: 10.18677/EnciBio_2021D31.

NOGUEIRA, L. Qualidade do solo: o que é e como avaliar em sua propriedade. **Blog da Aegro**. Porto Alegre, 10 set. 2020. Atualizado em 22 fev. 2024. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/qualidade-do-solo/#Qualidade-do-solo>.

PATEL, K. K.; BAHILIYA, A. K.; PANDEY, A. K. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *In*: 6th International Conference on Advances in Agriculture Technology and Allied Sciences (ICAATAS 2023), 6., 2023, Secunderabad, Telangana, Índia. **Anais** [...]. Secunderabad: Loyola Academy; New Delhi: Society of Agricultural Research and Social Development, 2023.

PETTER, F. A., SOLER DA SILVA, M. A., MADARI, B. E., CARNEIRO, M. A. C., CARVALHO, M. T. M., PACHECO, L. P., MARIMON JÚNIOR, B. H. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2012. 47(5), 603–611.

PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C. **Milho**: sistemas diferenciais de cultivo. Brasília, DF: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/sistemas-diferenciais-de-cultivo>.

POSTMA-BLAAUW, M. B.; BORNEMAN, J.; RYAN, M. H.; FRETWELL, S.; KENNEDY, N.; WHELAN, J.; DALE, A.; HEDLEY, C. B.; BELL, M.; BARRATT, B. I. P.; WILSON, B. A.; FERRIS, H.; BELL, T. Soil biota community structure and abundance under agricultural intensification and extensification. **Ecology**, v. 91, n. 2, p. 460–473, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1890/09-0666.1>.

PRIETO, L. M. **Produção, caracterização parcial e aplicação ambiental de ramnolipídios de Pseudomonas aeruginosa isolada de resíduos de pescado**. 2007. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/3556/microsoft+word+-+dissertao.final.pdf?sequence=1>

PROCHNOW, F. D. **Biochar**: uma revisão bibliográfica dos avanços científicos e industriais, das possibilidades no contexto brasileiro e do seu potencial para o desenvolvimento sustentável. 2023. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/252868>.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20123383734>.

QUAN, L.; CHEN, J.; ZHANG, Z.; HU, W.; HUANG, J.; YU, L.; ZHANG, J.; GUO, J. Biochar amendment alleviates soil microbial nitrogen and phosphorus limitation and increases soil heterotrophic respiration under long-term nitrogen input in a subtropical forest. **Science of The Total Environment**, v. 951, p. 175867, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175867>.

RAMÍREZ, V. S.; MATOS, A. T. de. Influence of the receiving soil texture and climatic and environmental conditions on the rate and fraction of mineralization of organic matter in the soil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 315-323, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200122>.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 2011. 420 p.

REINEKE, W.; SCHLÖMANN, M.. Microorganisms at different sites: living conditions and adaptation strategies. In: _____ (ed.). **Environmental microbiology**. Berlin; Heidelberg: Springer Spektrum, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-66547-3_10.

RODRIGO-COMINO, J.; LOPEZ-VICENTE, M. ; KUMAR, V. ; RODRIGUEZ-SEIJO, A. ; VALKO, O. ; ROJAS, C. ; PANAGOS, P. Desafios da ciência do solo numa nova era: uma visão transdisciplinar de temas relevantes. **Pesquisa sobre ar, solo e água**, v. 13, 2020. DOI: 10.1177/1178622120977491.

SABATÉ, D. C., PETROSELLI, G., ERRA-BALSELLS, R., AUDISIO, C., BRANDAN, C. P. Beneficial effect of *Bacillus* sp. P12 on soil biological activities and pathogen control in common bean. **Biological Control**. 2020. DOI:10.1016/j.biocontrol.2019.104131

SANNINO, C.; CANNONE, N.; D'ALÒ, F.; FRANZETTI, A.; BATTISTEL, D.; ZUCCONI, L.; SELBMANN, L.; TURCHETTI, B.; BUZZINI, P.; GUGLIELMIN, M.; MEZZASOMA, A.; ONOFRI, R. Fungal communities in European alpine soils are not affected by short-term in situ simulated warming more than bacterial communities. **Environmental Microbiology**, v. 24, n. 9, p. 4178–4192, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16090>.

SANTOS, G. C. R.; MELO JUNIOR, J. L. A.; MELO, L. D. F. A.; DE SOUZA, M. S.; PAES, R. A.; BADJI, C. A.; COSTA, J. F. O.; CRISÓSTOMO, N. M. S. Análise de imagens na determinação da viabilidade de sementes de milho pelo teste de tetrazólio. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 9, p. 14940–14957, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.9-067.

SANTOS, H. G.; FRANÇA, J. A. O.; CURTI, N.; ALMEIDA, C. F.; LIMA, G. P.; MELO, S. J. M.; OLIVEIRA, A. J. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. Disponível em: /SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf. Acesso em: 28 jun. 2023.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FÁBRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 11–21, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002>.

SCHIMEL, J.; SCHAEFFER, S. M. Microbial control over carbon cycling in soil. *Front. Microbiol.* 3: 348. 2012. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00348>

SILVA, É. J.; ESPERANCINI, M. S. T. Análise de viabilidade econômica do milho safrinha no Paraná. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 2, 2021. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1615>.

SINGH, S.; MURUGAN, K.; SHYU, D. J. H. Microbial community and management of soil health for environmental sustainability. In: _____ (Org.). **Environmental nexus approach: management of water, waste, and soil**. Boca Raton: CRC Press, 2025. Cap. 22. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003408352-22/microbial-community-management-soil-health-environmental-sustainability-shubhra-singh-kadarkarai-murugan-douglas-shyu>.

SIMON, C. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R.. Soil quality literature in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210103, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210103>.

SITUMEANG, Y. P. **Biochar bambu perbaiki kualitas tanah dan hasil jagung**. Surabaya: Scopindo Media Pustaka, 2020. Disponível em: <https://repository.warmadewa.ac.id/id/eprint/1047/>.

SILVA JUNIOR, J. F. D. ; SIQUEIRA, D. S. ; MARQUES JUNIOR, J. ; PEREIRA, G. T. Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 358-363, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400012>.

SOUZA, R.J, FERREIRA NETO, R.A, DA SILVA, A.A, BARROS, B.D, GIONGO, V, DE FREITAS, A. D. Produção de biomassa e relação C/N em plantas utilizadas como adubos verdes no município de Juazeiro-BA. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 35., 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. Disponível em: <https://eventossilos.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/1895.pdf>.

SOUZA, H. A.; SAGRILO, E.; FREITAS, R. C. A.; CUNHA, J. R.; SOUSA, D. J. A. T.; BRITO, L. R. **Biochar, calagem e micronutrientes no desenvolvimento de plantas de soja**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2020. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 125). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1125717/1/BiocharCalagemMicronutrientesSojaBoletimPesquisa125.2020.pdf>.

SPERA, S. T.; DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; COELHO, M. R.; MAGALHÃES, C. A. S.; LEITE SOBRINHO, J. B. P.; TORRES, G. N. Solos de textura leve no Mato Grosso: desafios na agropecuária. In: FARIAS NETO, A. L.; NASCIMENTO, A. F.; ROSSONI, A. L.; MAGALHÃES, C. A. S.; ITUASSU, D. R.;

HOOGERHEIDE, E. S. S.; IKEDA, F. S.; FERNANDES JUNIOR, F.; FARIA, G. R.; ISERNHAGEN, I.; VENDRUSCULO, L. G.; MORALES, M. M.; CARNEVALLI, R. A. (ed.). **Embrapa Agrossilvipastoril**: primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma agropecuária sustentável. Brasília, DF: Embrapa, 2019. pt. 1, cap. 5, p. 52-60.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; VASCONCELOS DE MACÊDO, J. L.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, v. 291, p. 275–290, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9>.

STEFFEN, G. P. K.; STEFFEN, R. B.; BOENI, M.; SCHÚ, A. L.; MALDANER, J.; CONTERATO, I. F. **A importância do solo para a sustentação da vida no planeta Terra**. Porto Alegre: SEAPI/DDPA, 2024. 24 p. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202406/20101616-ebook-a-importancia-do-solo-para-a-sustentacao-da-vida-no-planeta-terra.pdf>.

SWISHER, R.; CARROLL, G. C. Fluorescein diacetate hydrolysis as an estimator of microbial biomass on coniferous needle surfaces. **Microbial Ecology**, v. 6, n. 3, p. 217-226, 1980. DOI: <https://doi-org.ez259.periodicos.capes.gov.br/10.1007/BF02010387>.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulphatase activity in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 34, p. 225–229, 1970. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400020016x>.

TEIXEIRA, C.; VIEIRA, S. M. Solo na escola: uma metodologia de educação ambiental no ensino fundamental. **Revista de Educação Ambiental**, v. 20, n. 77, 2018. Disponível em: <https://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1624>.

TOMAZELLI, D.; GÓSS-SOUZA, D.; DE OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; KLAUBERG-FILHO, O. **Biologia do solo**: conceitos e aplicações nas ciências agrárias. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2024.

USHARANI, K. V.; ROOPASHREE, K. M.; NAIK, D. Role of soil physical, chemical and biological properties for soil health improvement and sustainable agriculture. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 5, p. 1256-1267, 2019.

ULYETT, J.; SAKRABANI, R.; KIBBLEWHITE, M.; HANN, M. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 96–104, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12081>.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; WAGG, C. Diversidade microbiana do solo e funcionamento do agroecossistema. **Plant and Soil**, v. 363, p. 1-5, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1545-4>.

VASQUES, N. C.; LUSTRI, B. M.; RAMARI, T. D. O. I.; GASPAROTTO, F. Resposta da biomassa microbiana a diferentes corretivos de solo. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 7, p. 161-169, 2020.

WARDLE, D. A. Comunidades e Ecossistemas. Ligando os Componentes da Superfície e do Subsolo. **Princeton University Press**, Princeton, NJ. 2002.

Disponível em:

<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9781400847297/html>

ZHOU, L. S; TANG, K.; GUO, S. X. The plant growth-promoting fungus (PGPF) *Alternaria* sp. A13 markedly enhances *Salvia miltiorrhiza* root growth and active ingredient accumulation under greenhouse and field conditions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 1, p. 270, 2018. DOI: 10.3390/ijms19010270

XIANG, Y., LIU, Y., NIAZI, N. K., BOLAN, N., ZHAO, L., ZHANG, S., XUE, J., YAO, B., LI, Y. Biochar addition increased soil bacterial diversity and richness: Large-scale evidence of field experiments. **Science of The Total Environment**, 893, 164961. 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164961

ZUCARELI, C.; BARZAN, R. R.; SILVA, J. B.; CHAVES, D. P. Associação de fosfatos e inoculação com *Bacillus subtilis* e seu efeito no crescimento e desempenho produtivo do feijoeiro. **Revista Ceres**, v. 65, p. 189–195, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865020011>.