

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE
DA SOJA EM FUNÇÃO DE MANEJOS DE SOLO E DE CULTURAS

Hercules Lazari Meurer

DOURADOS - MS

2026

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE
DA SOJA EM FUNÇÃO DE MANEJOS DE SOLO E DE CULTURAS**

HERCULES LAZARI MEURER

Engenheiro Agrônomo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal da Grande Dourados – Faculdade de Ciências Agrárias, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Gessi Ceccon

DOURADOS - MS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M598a Meurer, Hercules Lazari

ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DE MANEJOS DE SOLO E DE CULTURAS [recurso eletrônico] / Hercules Lazari Meurer. -- 2026.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Gessi Ceccon.

Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2026.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Sistema plantio direto. 2. Cerrado. 3. Respiração microbiana. I. Ceccon, Gessi. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DE MANEJOS DE SOLO E DE CULTURAS

Por

Hercules Lazari Meurer

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de

MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovada em: 24/02/2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br GESSI CECCON
Data: 26/02/2026 09:44:38-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Gessi Ceccon
Presidente/orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br LUAN MARLON RIBEIRO
Data: 27/02/2026 16:21:46-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Luan Marlon Ribeiro
Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br ELAINE REIS PINHEIRO LOURENTE
Data: 27/02/2026 15:06:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.ª Dr.ª Elaine Reis Pinheiro Lourente
Membro Titular Externo

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar e pelas oportunidades que tive ao longo do meu percurso pessoal e profissional.

Ao meu pai, Rubim Kuhnen Meurer, e à minha mãe, Sara da Silva Lazari Meurer, por todo o apoio e incentivo em mais esta etapa da minha vida.

À minha esposa e companheira, Cássia Gonçalves Alencar, e ao meu filho, Ítalo Alencar Meurer, por estarem presentes e me motivarem em todos os momentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade de realização do curso de mestrado, e ao corpo docente do curso, pelas contribuições à minha formação profissional.

Ao meu orientador, Dr. Gessi Ceccon, pela oportunidade, contribuições e orientações ao longo desta trajetória acadêmica.

À Embrapa Agropecuária Oeste, pela oportunidade de realização da pesquisa em suas instalações, pela disponibilização de estrutura e pelo apoio concedido.

Aos assistentes da Embrapa Agropecuária Oeste, pelo auxílio nas atividades de campo, laboratório e casa de apoio.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, pelas correções e contribuições ao meu trabalho.

Aos meus colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pelas trocas de conhecimentos.

RESUMO

MEURER, H. L. **Atributos químicos e microbiológicos do solo e produtividade da soja em função de manejos de solo e de culturas.** 2026. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

O plantio direto é amplamente utilizado no Brasil, no entanto ainda são limitados os estudos que avaliam como os diferentes métodos de manejo adotados no momento da implantação do sistema podem influenciar a dinâmica de atributos químicos e microbiológicos do solo no longo prazo. Desta forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito residual de diferentes sistemas de manejo do solo utilizados na implantação do sistema plantio direto, associados a cultivos de outono-inverno, sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo, e a produtividade da soja. O experimento foi realizado na Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados, MS, em um Latossolo Vermelho Distroférrico de textura muito argilosa. O experimento foi em esquema fatorial 4x4 em blocos casualizados em três repetições. O primeiro fator foi constituído pelos manejos de solo, estabelecidos em março de 2020: arado de discos, arado de aivecas, escarificador e plantio direto. O segundo fator os cultivos de outono-inverno: milho, milho + *Brachiaria ruziziensis*, *B. ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* e mix de plantas (Milho + *B. ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* + *C. spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.)). Na pré-semeadura da soja realizou-se coletas de solo para avaliação dos atributos químicos, e em R1 para a análise dos atributos microbiológicos. Na soja avaliou-se componentes de produtividade em R6, e produtividade na colheita. Os dados foram submetidos às análises de variância e correlação de Pearson, as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os manejos de solo realizados na implantação do sistema plantio direto, influenciaram principalmente os atributos químicos do solo, promovendo redistribuição de nutrientes no perfil, com teores de fósforo na camada 10–20 cm variando de 15,29 mg dm⁻³ no plantio direto a 24,96 mg dm⁻³ no arado de discos. Os cultivos de outono-inverno exerceram efeito pontual sobre o fósforo superficial, com maior teor no consórcio braquiária + crotalária (46,54 mg dm⁻³). Os manejos de solo resultaram em efeitos residuais sobre os componentes de produtividade da soja, como a massa de 100 grãos, porém não resultaram em diferenças significativas na produtividade de grãos. Conclui-se que, o revolvimento do solo associado à incorporação de calcário na implantação do plantio direto promove a redistribuição de nutrientes sem efeitos residuais negativos sobre a microbiota do solo e a produtividade da soja após quatro anos.

Palavras-chave: Sistema plantio direto; Cerrado; Respiração microbiana.

ABSTRACT

MEURER, H. L. **Soil chemical and microbiological attributes and soybean yield as affected by soil and crop management systems.** 2026. Dissertation (Master's Degree in Agronomy) – Federal University of Grande Dourados, Dourados, MS.

No-tillage is widely adopted in Brazil; however, studies evaluating how different soil management methods used during system establishment influence the long-term dynamics of soil chemical and microbiological attributes are still limited. Therefore, this study aimed to evaluate the residual effect of different soil management systems used during the establishment of no-tillage, associated with autumn–winter crops, on soil chemical and microbiological attributes, as well as soybean yield. The experiment was carried out at Embrapa Agropecuária Oeste, in Dourados, MS, Brazil, on a very clayey dystroferric Red Latosol. The experiment followed a 4×4 factorial arrangement in a randomized block design and three replications. The first factor consisted of soil management practices: disc plow, moldboard plow, chisel plow, and no-tillage. The second factor comprised autumn–winter crops: maize, maize + *Brachiaria ruziziensis*, *B. ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca*, and a crop mixture (maize + *B. ruziziensis* + *C. ochroleuca* + *C. spectabilis* + *Vigna radiata* L.). Prior to soybean sowing, soil samples were collected to evaluate chemical attributes, and at the R1 stage to assess microbiological attributes. Soybean yield components were evaluated at the R6 stage, and grain yield was determined at harvest. Data were subjected to analysis of variance and Pearson correlation analysis, and means were compared using the Tukey test ($P < 0.05$). Soil management systems used during the establishment of no-tillage mainly affected soil chemical attributes, promoting nutrient redistribution within the soil profile, with phosphorus levels in the 10–20 cm layer ranging from 15.29 mg dm^{-3} under no-tillage to 24.96 mg dm^{-3} under disk plowing. Autumn–winter crops had a localized effect on surface phosphorus, with the highest value observed in the *B. ruziziensis* + *C. ochroleuca* intercrop (46.54 mg dm^{-3}). Soil management systems resulted in residual effects on soybean yield components, such as 100-grain weight, but did not lead to significant differences in grain yield. It is concluded that soil disturbance associated with lime incorporation during the establishment of no-tillage promotes nutrient redistribution without negative residual effects on soil microbiota and soybean yield after four years.

Keywords: No-tillage; Cerrado; Microbial respiration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Precipitação pluviométrica, temperaturas máximas e mínimas médias diárias, em decêndios registradas durante o cultivo da soja safra 2024/25. Dourados, MS, 2026. Fonte: Guia Clima, estação - Embrapa - Dourados/MS.	21
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área do experimento, na implantação do projeto em 2020. Dourados, MS, 2026.	20
Tabela 2 - Teores de matéria orgânica no solo (g dm^{-3}), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo realizados em 2020, e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.	26
Tabela 3 - Teores de fósforo no solo (mg dm^{-3}), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo realizados em 2020, e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.	27
Tabela 4 - Teores de potássio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.	29
Tabela 5 - Teores de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.	30
Tabela 6 - Teores de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.	32
Tabela 7 - Atributos microbiológicos, na profundidade 0–10 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, no florescimento (R1) da soja. Dourados, MS, 2026.	33
Tabela 8 - Atividade enzimática do solo, na camada 0–10 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, no florescimento (R1) da soja. Dourados, MS, 2026.	35
Tabela 9 - Variáveis da soja (R6) após manejos de solo e cultivos de outono-inverno. Dourados, MS, 2026.	36
Tabela 10 - Componentes de produtividade da soja após manejos de solo, Dourados, MS, 2026.	37
Tabela 11 - Altura de plantas na colheita, massa de hastes e produtividade de grãos após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.	38
Tabela 12 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre indicadores microbiológicos do solo.	40

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1. REVISÃO DE LITERATURA	11
1.1. Manejo e fertilidade do solo	11
1.2. Uso de plantas de cobertura	14
1.3. Atividade microbiana do solo	16
1.4. Atividade enzimática do solo	17
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1. Local, Clima e Solo.....	20
2.2. Histórico da área	21
2.3. Delineamento Experimental.....	22
2.4. Implantação dos cultivos de outono-inverno	22
2.5. Implantação da cultura da soja.....	23
2.6. Avaliações.....	23
2.6.1. Atributos químicos do solo.....	23
2.6.2. Atributos microbiológicos do solo	23
2.6.3. Avaliações na soja	25
2.6.4. Análise estatística	25
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
3.1. Atributos químicos do solo	26
3.2. Atividade microbiana do solo	32
3.3. Atividade enzimática	34
3.4. Produtividade da soja.....	36
4. CONCLUSÕES	41
5. REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE A. Resumo da análise de variância para o N total; P ₂ O ₅ ; K ⁺ ; Ca ²⁺ ; Mg ²⁺ ; MO; Ctotal%; pH CaCl ₂ ; CTC; SB; Cu; Fe; Mn; Zn; V% e H ⁺ Al ³ , avaliados antes da semeadura da soja 2024/25, nas camadas de 0–10; 10–20; 20–30 e 30–40 em manejos de solo e sistemas de cultivo. Dourados, MS 2026.....	53

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de soja, com produção estimada para a safra 2024/2025 de 168,34 milhões de toneladas, valor 14% superior à safra 2023/2024, em uma área plantada de 47,52 milhões de hectares (CONAB, 2025). O Cerrado corresponde por 54% da produção nacional de soja (CONAB, 2025). Esse bioma alcançou expressiva participação na produção de soja nas últimas quatro décadas. A expansão de culturas temporárias no Cerrado foi impulsionada pela adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo, como o Sistema Plantio Direto (SPD) (Santana et al., 2020).

A adoção do SPD na agricultura tem como principal objetivo a preservação do solo e da água. Esse sistema baseia-se em três pilares fundamentais: o revolvimento mínimo do solo, a rotação de culturas e a manutenção permanente da palhada cobrindo o solo. Quando se trata de sustentabilidade na agricultura, um importante aspecto a ser considerado é a qualidade do solo, que pode ser avaliada pelas suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Dentre essas, as propriedades biológicas são extremamente sensíveis para identificar alterações provocadas pelo manejo, adubação, sistema de cultivo, entre outras modificações antrópicas no ambiente (Passos et al., 2008; Passos et al., 2018; Aragão et al., 2020).

Os benefícios do uso do SPD quanto à preservação das características físicas, químicas e biológicas do solo são amplamente reconhecidos. No entanto, estudos de longo prazo em sistemas de plantio direto apontam para a formação de gradientes de pH e concentração de nutrientes ao longo do perfil do solo, com redução do pH nas camadas superficiais e aumento de alumínio trocável, além de evidências de acúmulo diferencial de elementos essenciais e estratificação química associada à aplicação superficial de fertilizantes e menor incorporação mecânica do solo (Souza et al., 2023).

Esses problemas podem ter origem natural, decorrente do não revolvimento do solo, ou estarem relacionados ao manejo inadequado da lavoura, e a não observância dos princípios fundamentais do SPD (Pias e Bayer, 2020). Estudos de longo prazo demonstram que a correção da acidez do solo realizada com incorporação mecânica antes da consolidação do SPD resulta em uma maior neutralização de acidez em profundidade e menores gradientes químicos ao longo do perfil, enquanto aplicações apenas superficiais tendem a corrigir apenas as camadas mais rasas do solo ao longo de vários anos, mantendo atributos adversos nas camadas inferiores (Santos et al., 2018).

A ausência da rotação de culturas agrava esse cenário, uma vez que o cultivo contínuo de uma mesma espécie leva a extração seletiva de determinados nutrientes, em profundidades

específicas em que seu sistema radicular permite explorar, contribuindo para a formação de gradientes. Em contrapartida, a rotação de culturas e os cultivos consorciados permitem uma exploração mais ampla do solo, promovem uma extração mais equilibrada de nutrientes e favorecem o aumento e a diversificação da população de microrganismos (Carvalho et al., 2018).

Embora a estratificação de nutrientes e alterações no pH do solo sob SPD estejam amplamente documentadas (Souza et al., 2023), ainda são limitados os estudos que avaliam como os diferentes métodos de manejo adotados no momento da implantação do sistema podem influenciar a dinâmica química e microbiológica do solo no longo prazo, especialmente aqueles relacionados à incorporação ou não de corretivos. Considerando que o SPD pressupõe ausência de revolvimento após sua consolidação, decisões tomadas na fase inicial podem resultar em alterações persistentes na fertilidade do solo e na formação de gradientes químicos, com possíveis reflexos sobre a produtividade das culturas e a atividade microbiológica ao longo dos anos (Santos et al., 2018 e Santana et al., 2020).

Diante do exposto, o presente estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito residual de diferentes sistemas de manejo do solo utilizados na implantação do sistema plantio direto, associados a cultivos de outono-inverno, sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo, e a produtividade da soja.

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. Manejo e fertilidade do solo

O sistema de manejo adequado é o principal fator a se considerar quando se busca sustentabilidade da atividade agrícola, uma vez que o sistema de preparo de solo e os sistemas de cultivo interferem diretamente nas propriedades, físicas, químicas e biológicas do solo, propriedades estas, que são os pilares sobre os quais se sustentam a qualidade do solo, como descrito por Demattê e Demattê (2024).

Por meio do manejo de solo, busca-se proporcionar condições ideais para germinação das sementes e estabelecimento das plântulas. Os sistemas de manejo diferem-se quanto ao grau de mobilização do solo e forma de deposição da matéria orgânica, podendo ser realizado por meio dos preparos com revolvimento do solo, sendo preparo convencional e cultivo mínimo ou reduzido, além das formas conservacionistas, semeadura direta e sistema plantio direto (Coêlho, 2020).

O preparo convencional do solo caracteriza-se no revolvimento para eliminação de plantas daninhas, incorporação de matéria orgânica e/ou fertilizantes e corretivos no solo, sendo realizado em duas etapas, preparo primário e secundário. No preparo primário utiliza-se arado ou grade pesada por ser uma operação mais grosseira, realizada para descompactar o solo, incorporar corretivos, fertilizantes, resíduos vegetais ou plantas daninhas. Na segunda etapa é realizado o nivelamento do terreno com uma grade niveladora para uniformizar o terreno, facilitando a semeadura (Sithole e Mafongoya, 2016).

Os equipamentos de disco são muito eficientes na incorporação de insumos e materiais vegetais, porém tem a desvantagem de causar maior compactação abaixo da camada arável do que o arado de aivecas (AA) e escarificador (ES) (Demattê e Demattê 2024). O uso intensivo do arado de discos pode causar compactação do solo abaixo da camada serviço, o que dificulta o desenvolvimento radicular das plantas e consequentemente a absorção de nutrientes por interceptação radicular, além disso pode acarretar em perdas de solo por erosão, devido a redução da permeabilidade da água no solo e ausência de cobertura vegetal (Silva Pereira et al., 2021).

No preparo convencional do solo, também pode ser utilizado o arado de aivecas, que recebe este nome por apresentar uma superfície torcida, responsável por elevar, torcer e inverter parcialmente a camada de solo trabalhada. O arado de aivecas promove boa incorporação dos resíduos vegetais, podendo ser mais indicado quando se trabalha com coberturas vegetais. No

entanto seu uso deixa a superfície do solo desprotegida, uma vez que inverte parcialmente a camada superficial do solo, o que também contribui para a aceleração do processo de decomposição diminuindo o teor de matéria orgânica no solo (Silva et al., 2021).

Já o cultivo mínimo ou reduzido, tem como característica a redução do número de operações realizadas no solo, diminuindo a passagem de máquinas, pode ser realizado com apenas uma passagem de grade, é caracterizado por manter grande parte da superfície do solo coberta por resíduos vegetais (Da Silva, 2023). As vantagens desta prática são: economia nas operações, aumento na concentração de matéria orgânica no solo, melhoria das propriedades físicas e químicas, além de prevenção de erosões. Em alguns casos, o uso do arado escarificador pode ser considerado preparo reduzido por causar menor perturbação do solo em comparação ao preparo convencional com aração e gradagem pesada, favorecendo a descompactação sem inversão completa do perfil e preservando parte da cobertura de palhada (Cavalaris et al., 2023).

O arado escarificador, tem função de descompactar o solo, a uma profundidade de 20 a 25 cm, este implemento possui hastes que produzem superfícies mais rugosas que os equipamentos de discos, seu uso tem por objetivo reduzir a densidade do solo, aumentar a porosidade e, ao mesmo tempo romper as camadas superficiais encrostadas, e camadas subsuperficiais compactadas (Monteiro et al., 2017). Este implemento apresenta a vantagem de manter maior taxa de cobertura morta sobre o solo quando comparado à grade de discos e ao arado de aivecas, porém é pouco eficiente na eliminação de plantas daninhas, e na incorporação e mistura de fertilizantes ao solo (Cavalaris et al., 2023).

Já o Sistema Plantio Direto (SPD), é um sistema no qual o solo é revolvido apenas na linha de semeadura, é considerado um sistema conservacionista e sustentável, que tem sido adotado em todo o mundo, em especial no Brasil (Passos et al., 2018), que atualmente possui mais de 33 milhões de hectares cultivadas sob SPD (Silva et al., 2022).

Esse sistema se sustenta sobre três pilares fundamentais: o revolvimento mínimo do solo, a rotação de culturas e a manutenção permanente da palha sobre o solo (Kochhann e Denardin, 2000). Quando esses preceitos são respeitados, o sistema proporciona diversos benefícios, entre os quais se destacam: a prevenção de erosões do solo, a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e a redução da infestação de plantas daninhas, devido a supressão da germinação de sementes e ao impedimento do crescimento de plântulas (Araújo, 2019). Além disso, contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa e atua positivamente no ciclo hidrológico (Silva et al., 2022)

Para o bom funcionamento do SPD são necessários alguns cuidados quanto à sua implantação. Antes de iniciar o sistema, é necessária qualificação, pois trata-se de um sistema

complexo que exige conhecimento amplo e domínio de todas suas etapas, as tomadas de decisão precisam ser pautadas a nível de sistemas de produção. Outra etapa essencial é o gerenciamento e o treinamento da mão de obra que irá operar os maquinários e realizar os tratos culturais (Passos et al., 2018).

No SPD é importante que o solo possua boa drenagem, este fator irá garantir que após a semeadura, a ocorrência de volumes elevados de chuva, não acarretem em eventuais alagamentos e consequentemente quebra de produção. Por isso, antes de iniciar o sistema deve-se realizar a descompactação do solo através do seu revolvimento mecânico quando constatada a necessidade prévia (Shaheb et al., 2021). Outro cuidado precedente à implantação do sistema, é a verificação da necessidade de calagem e gessagem, pois a correção da acidez deve ser realizada permitindo incorporação até cerca de 30 cm. Após a adoção do sistema, o revolvimento do solo é evitado, e a calagem passa a ser feita superficialmente, enquanto a gessagem favorece a melhoria da fertilidade em profundidade mesmo sem incorporação, contribuindo para o desenvolvimento radicular e produtividade das culturas (Andrade et al., 2024).

Quanto à correção da fertilidade química do solo, deve-se realizar a amostragem do solo, e análise química, para identificar a necessidade de adubação. A adubação de correção dos teores de fósforo, potássio, enxofre e micronutrientes deve ser realizada antes de iniciar o sistema, a fim de elevar os níveis destes nutrientes para suprir as necessidades nutricionais das plantas. As adubações de manutenção após o estabelecimento do sistema, devem ser realizadas a lanço ou em linha de semeadura, precisam ser pensadas a nível de sistema levando-se em consideração a extração e exportação dos nutrientes pelas culturas (Passos et al., 2018; Souza et al., 2024).

Após dar início ao planejamento do sistema e adequar a área para receber os cultivos, é necessário, na fase de implementação e após sua consolidação, atender às premissas básicas do sistema, (mínimo revolvimento do solo, rotação de cultura e cobertura permanente do solo). Para isso, a definição adequada das culturas envolvidas e de seu manejo é fundamental para garantir a continuidade e a eficiência dessas premissas no campo (Araújo, 2019).

Desta forma, o uso de plantas de cobertura, e a rotação de culturas são fatores determinantes para o adequado funcionamento do sistema plantio direto, preferencialmente alternando culturas comerciais, como soja, milho, feijão, sorgo, com adubos verdes como estilosantes, crotalária, feijão guandu e gramíneas, proporcionando cobertura de excelente qualidade ao solo, alta ciclagem de nutrientes, proteção contra a exposição a raios solares e a chuvas intensas (Fernandes; Tejo; Arruda, 2019; Michelon et al., 2019).

O manejo da fertilidade do solo tem por objetivo fornecer condições ideais de pH, soma de bases, CTC, macro e micronutrientes, bem como melhoria das propriedades físicas e biológicas do solo para que as plantas cultivadas expressem seu máximo potencial produtivo (Tang et al., 2025). Tem se consolidado a visão de que a fertilidade do solo deve ser trabalhada buscando-se a melhoria do sistema de produção como um todo e não de cada cultura isolada (De Resende et al., 2020).

O condicionamento físico-químico do perfil do solo é fundamental para favorecer o desenvolvimento mais profundo e eficiente do sistema radicular. Com raízes capazes de explorar maior volume de solo, as plantas tornam-se mais resilientes às variações climáticas, especialmente durante períodos de veranico. Esse condicionamento ocorre a partir da aplicação de práticas agrícolas que visam a reposição de nutrientes no solo, por meio da aplicação de fertilizantes químicos minerais, orgânicos ou a combinação de ambos (Abebe et al., 2022).

A calagem desempenha papel fundamental na produtividade das grandes culturas, especialmente nos solos de Cerrado, caracterizados por elevada acidez. De acordo com Fernandes et al., (2020), a aplicação de calcário promove a neutralização de elementos tóxicos, como alumínio e manganês, contribuindo para melhorar o ambiente radicular. Além disso, o uso de gesso agrícola pode favorecer o aprofundamento das raízes, atuando como condicionador da subsuperfície e fornecendo nutrientes como cálcio e enxofre.

1.2. Uso de plantas de cobertura

Com o avanço da cultura da soja no Cerrado, surgiu a necessidade de introdução de plantas de cobertura que proporcionam adequada proteção do solo e contribuíssem para o aumento dos teores de matéria orgânica, minimizando os impactos do uso intensivo do solo. De acordo com Carvalho et al., (2018), o uso dessas plantas pode promover a sustentabilidade do sistema agrícola, aumentando a diversidade biológica, interrompendo ciclo de pragas, doenças e plantas daninhas, com menores custos de produção.

No Cerrado, a adoção de plantas de cobertura visa mitigar os impactos negativos da sucessão soja-milho, que pode levar a degradação do solo e favorecer a proliferação de fitopatógenos, insetos-praga e plantas daninhas (Ribeiro et al., 2018). O cultivo alternado de culturas torna viável o sistema plantio direto, promovendo a conservação da umidade do solo, melhoria das características físicas, químicas e biológicas, aumento da matéria orgânica, redução de patógenos e incremento da população de microrganismos benéficos, resultando em maior produtividade das culturas (Ribeiro et al., 2018; Angeletti et al., 2018).

Na região Centro-Oeste, a soja, por sua relevância econômica e exigências climáticas, é cultivada na safra de primavera-verão, enquanto o milho é cultivado no outono-inverno. Após a colheita da soja, o milho se beneficia do nitrogênio deixado ao solo, produto da simbiose entre a soja e bactérias do gênero *Bradyrhizobium* spp (Silva-Abud et al., 2021). Em seu estudo Yan et al. (2024) demonstrou que a soja cultivada em sistemas de rotação milho-soja tem o potencial de substituir mais de 180 kg ha⁻¹ de ureia aplicada. Além disso, pode melhorar a eficiência do uso de N pelas plantas em 1,4% a 5,6% comparando a rotação soja-milho ao cultivo contínuo do milho. Em áreas com sucessão soja-milho, o consórcio entre milho e braquiária tem sido uma estratégia eficiente para proteção e melhoria do solo durante o outono-inverno (Ceccon et al., 2018).

A presença de palha e raízes da forrageira no consórcio contribui para menor oscilação térmica no solo, aumento da atividade microbiana, melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, promovendo maior produtividade tanto para o milho quanto para a soja na sequência (Donagemma et al., 2016). O consórcio de milho com braquiária pode ser pastejado após a colheita do milho, ou simplesmente permanecer na área formando cobertura até a semeadura da soja (Ceccon et al., 2018; Lorenzetti et al., 2024). Devido sua alta relação C/N a palha da braquiária apresenta decomposição lenta, que favorece a presença da cobertura por maior tempo no solo, à medida que ocorre sua decomposição há o fornecimento dos nutrientes ao solo, favorecendo a soja durante seu desenvolvimento (Neves et al., 2018).

Mesmo havendo benefícios do consórcio milho-braquiária, quando há riscos de perdas do milho devido a condições climáticas, pode-se optar pela semeadura de plantas de cobertura exclusivas, em consórcio (duas espécies simultâneas) ou em mix (três ou mais espécies simultâneas em uma mesma área) (Pacheco et al., 2017).

As espécies destinadas à produção de palha devem apresentar alta relação C/N, o que permite maior permanência dos resíduos vegetais na área (Floss 2022). Plantas com sistema radicular profundo e vigoroso auxiliam na descompactação do solo, formação de bioporos e aumento da infiltração de água. Além disso, retiram nutrientes de camadas mais profundas do solo, que são liberados posteriormente durante a decomposição da biomassa (Lima et al., 2015).

Em estudo realizado por Araújo et al., (2019), foi observado uma redução de 98,9% na produção de massa seca da parte aérea de plantas daninhas 75 dias após a semeadura, quando se utilizou um mix de plantas de cobertura na entressafra, em comparação ao pousio. Torres et al., (2014), avaliando quatro espécies de cobertura, como crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* DC.), milheto ADR 500 (*Pennisetum glaucum*) e braquiária (*Urochloa brizantha* cv Marandu) verificaram que o milheto apresentou maior

produção de matéria seca, enquanto a crotalária e o feijão-de-porco tiveram maior taxa de decomposição e menor tempo de meia-vida.

Ao avaliarem a produtividade da soja e do milho após o cultivo de plantas de cobertura, Wolschick et al., (2018), identificaram correlação positiva entre a produção de biomassa da parte aérea de plantas de cobertura e o rendimento e massa de mil grãos do milho. No entanto, a produtividade de grãos da soja não foi influenciada. No mesmo estudo, observou-se que as características químicas e físicas do solo apresentavam pouca alteração em função das plantas de cobertura. Por outro lado, Veloso et al., (2022), avaliando diferentes plantas de cobertura sobre características agronômicas da soja em sistemas de plantio direto e convencional, constataram maior número de vagens por planta em áreas cultivadas com milheto, nabo forrageiro e feijão guandu como antecessoras.

Mesmo com os benefícios proporcionados pelo uso de plantas de cobertura ao sistema agropecuário, ainda são necessários mais estudos que aprofundem o entendimento sobre a dinâmica dessas espécies e os impactos positivos que podem gerar em sistemas de produção de culturas de alto valor econômico, como a soja e o milho, em regiões de grande importância para esses cultivos como no Cerrado.

1.3. Atividade microbiana do solo

Um aspecto essencial para a sustentabilidade agrícola é a qualidade do solo, que pode ser avaliada baseando-se em parâmetros químicos, físicos e microbiológicos (Aragão et al., 2020). Os microrganismos presentes no solo são responsáveis por diversos processos que reciclam energia, água e nutrientes do ambiente (Silva et al., 2021). Deste modo, é de grande importância o conhecimento da funcionalidade da microbiota do solo no contexto da sua qualidade, que está associada à estabilidade do ecossistema diante de alterações ambientais causadas por eventos naturais ou antrópicos (Vinhel-Freitas et al., 2017).

Os microrganismos são considerados parte viva da matéria orgânica, sendo responsáveis pela disponibilidade e qualidade dos nutrientes no solo, além de representar um importante reservatório de nutrientes. Sendo a camada superficial do solo a área de maior atividade da biomassa microbiana, devido a maior concentração de matéria orgânica disponível (CHEN et al., 2024).

Dentre os principais indicadores microbiológicos de qualidade do solo, estão incluídos o carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS), a respiração microbiana (C-CO₂), quociente metabólico (qCO₂) e quociente microbiano (qMic) (Maharjan et al., 2017).

O C-BMS é um indicador que representa a parte viva da matéria orgânica, composta por fungos, actinobactérias, bactérias e algas, é um importante parâmetro de ciclagem de nutrientes nos ecossistemas, dado ao fato que representa a fração da matéria orgânica do solo de mais rápida decomposição, é muito sensível a variações no ambiente, tais como: umidade, temperatura, manejo e qualidade dos resíduos (Barbieri et al., 2019; Vasconcelos et al., 2015).

Dentre as funções que esta fração desempenha é possível destacar a ciclagem de nutrientes, decomposição de compostos orgânicos no solo, fluxo de energia e solubilização de nutrientes (Silva et al., 2010). O C-BMS isoladamente não é um indicador de qualidade do solo muito informativo, sendo necessário o uso de outros indicadores que contribuam com seu potencial de bioindicação, tais como, C-CO₂, qCO₂ e qMic (Alves, 2011).

O C-CO₂ mede a atividade microbiológica do solo onde os microrganismos degradam compostos orgânicos a CO₂ (Silva et al., 2013). Quando a atividade microbiana é alta há maior decomposição da matéria orgânica e consequentemente maior liberação de nutrientes para as plantas, porém pode significar perda de carbono no solo em longo prazo (Novak et al., 2022). A umidade, temperatura, estrutura, textura e quantidade de matéria orgânica são alguns dos fatores que podem influenciar na respiração basal do solo (Silva et al., 2010).

O quociente metabólico (qCO₂) é um indicador biológico que representa a eficiência do uso do carbono pela comunidade microbiana, sendo calculado como a razão entre a respiração basal do solo e a biomassa microbiana do solo por unidade de tempo (Anderson e Domsch, 1993). Ele expressa quanto de CO₂ é liberado pela biomassa microbiana em um determinado período, representando a taxa de respiração específica da biomassa microbiana (Alves et al., 2011). Valores elevados de qCO₂ indicam um maior gasto energético por unidade de biomassa microbiana, o que pode ter relação com condições de estresse ambiental (Ashraf; Waqas; Rahman 2022).

O qMic representa a relação que há entre o carbono microbiano e o carbono orgânico total. Por meio dessa relação é possível identificar a qualidade da matéria orgânica e a quantidade de carbono imobilizado pela biomassa microbiana (Banning et al., 2008). Em áreas com baixa atividade microbiana são observados baixos valores de quociente microbiano, o que indica menor reserva de compostos orgânicos nestas áreas. Em contrapartida, altos índices de qMic é um indicativo de que a matéria orgânica do solo apresenta alta atividade e está sujeita a ser decomposta pela microbiota (Dadalto et al., 2015).

1.4. Atividade enzimática do solo

Análises de atividade enzimática do solo, bem como de outros atributos biológicos e/ou bioquímicos, têm permitido identificar com antecedência alterações nos solos, causadas pelo seu uso, manejo ou quaisquer outras influências antrópicas (Acosta-martínez et al., 2008).

As enzimas são biomoléculas que desempenham importante papel nos ciclos dos elementos no solo, contribuindo para a estabilidade dos ecossistemas (Burns et al., 2013; Nannipieri et al., 2018). Catalisam reações químicas e participam ativamente da ciclagem de nutrientes (Sinsabaugh et al., 2008). No solo, transformam nutrientes em formas assimiláveis pelas plantas (Balota et al., 2004; Nannipieri et al., 2020). São encontradas associadas a colóides de argila, matéria orgânica e células microbianas (Nannipieri et al., 2012; Burns et al., 2013). Três grupos de enzimas em especial têm recebido destaque por serem ótimos indicadores de qualidade do solo, sendo elas: a β -glicosidase, a arilsulfatase e a fosfatase ácida (Dick, 1994; Balota et al., 2013; Mendes et al., 2021).

As glicosidases estão entre as enzimas mais frequentes e abundantes no solo (Tabatabai 1994), sendo nomeadas conforme o tipo de ligação que são capazes de hidrolisar. A enzima β -glicosidase, assim como a arilsulfatase possui uma estreita relação com a matéria orgânica do solo, participando de sua ciclagem, essas enzimas não são influenciadas pela aplicação de adubos no solo, a β -glicosidase atua no ciclo do carbono, promovendo a decomposição da MO por meio da hidrólise de ligações glicosídicas em carboidratos complexos (Mendes et al., 2021).

A enzima arilsulfatase é uma enzima constitutiva, sua síntese possui relação direta com o conteúdo de carbono e enxofre no solo, foram originalmente descritas como fenolsulfatases, hidrolisam ésteres de sulfato com um radical aromático (ésteres fenólicos de ácido sulfúrico). Sua atividade não está relacionada à adubação mineral, é dependente do conteúdo de sulfato no solo e pode ser requisitada tanto para complementar a nutrição do enxofre, ou para competir com este elemento por cargas ou outros interferentes químicos no solo (Balota; Chaves, 2010).

Outro importante grupo de enzimas indicadoras de qualidade do solo são as fosfatases, assim denominadas, enzimas que catalisam a hidrólise do éster e anidros de fosfato. São classificadas de acordo com os compostos que hidrolisam: fosfomonoesterases, fosfodiesterases, fosfotriesterases, metafosfatase e pirofosfatases. A fosfomonoesterase tem sido frequentemente estudada devido sua grande importância na mineralização do fósforo presente em compostos orgânicos e na disponibilização às plantas. São classificadas como fosfatase ácida e alcalina a depender do meio ao qual apresente seu máximo desempenho (Balota et al., 2013).

As fosfatases podem ser consideradas boas indicadoras de qualidade do solo, a atividade dessa enzima está relacionada com os teores de P no solo, quando há baixa disponibilidade do

nutriente ocorre aumento na liberação da fosfatase, com o intuito de elevar a mineralização e a remobilização do fosfato, em contrapartida sua atividade decresce quando há aplicação de doses elevadas de fertilizantes fosfatados ao solo (Balota et al., 2013).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local, Clima e Solo

O experimento foi realizado na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, no município de Dourados, Mato Grosso do Sul, localizado nas coordenadas 22°13’ Sul e 54°48’ Oeste a 408m de altitude. De acordo com Köppen, o clima da região é classificado como Cwa, com verões quentes e invernos secos (Fietz et al., 2017). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, de textura muito argilosa (Santos et al., 2025). Para a caracterização da área, foi realizada a análise química e granulométrica do solo antes dos manejos de solo, nas profundidades 0–10, 10–20, 20–30 cm (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da área do experimento, na implantação do projeto em 2020. Dourados, MS, 2026.

Profundidade (cm)	pH (CaCl ₂)	K	Ca	Mg	P (Mehlich- 1)	Cu	Fe	Mn	Zn
		--- mmol _c /dm ³ ---			----- mg/dm ³ -----				
0–10	5,35	4,7	49,2	16,2	52,65	10,00	28,24	62,28	4,98
10–20	4,69	2,9	24,7	9,1	9,58	10,51	33,65	30,58	0,71
20–30	4,71	2,0	22,0	8,5	4,48	9,94	37,31	26,64	0,36
Ct		V (%)		CTC	CTC efetiva	Areia	Silte		Argila
(%)		--- mmol _c /dm ³ ---			----- g kg ⁻¹ -----				
0–10	1,94	57,79		12,13	7,21	140	364		496
10–20	1,93	36,51		10,05	4,15	114	222		663
20–30	1,26	35,95		9,04	3,67	113	234		652

pH = potencial hidrogeniônico; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; P = fósforo; Cu = cobre; Fe = Ferro; Mn = manganês; Zn = zinco; Ct = carbono total; V (%) = saturação por bases; CTC = capacidade de troca catiônica; CTC efetiva = capacidade de troca catiônica efetiva.

Os dados de precipitação pluviométrica e temperatura, no período deste trabalho, de outubro de 2024 a janeiro de 2025 foram coletados da estação meteorológica da Embrapa Agropecuária Oeste (Figura 1).

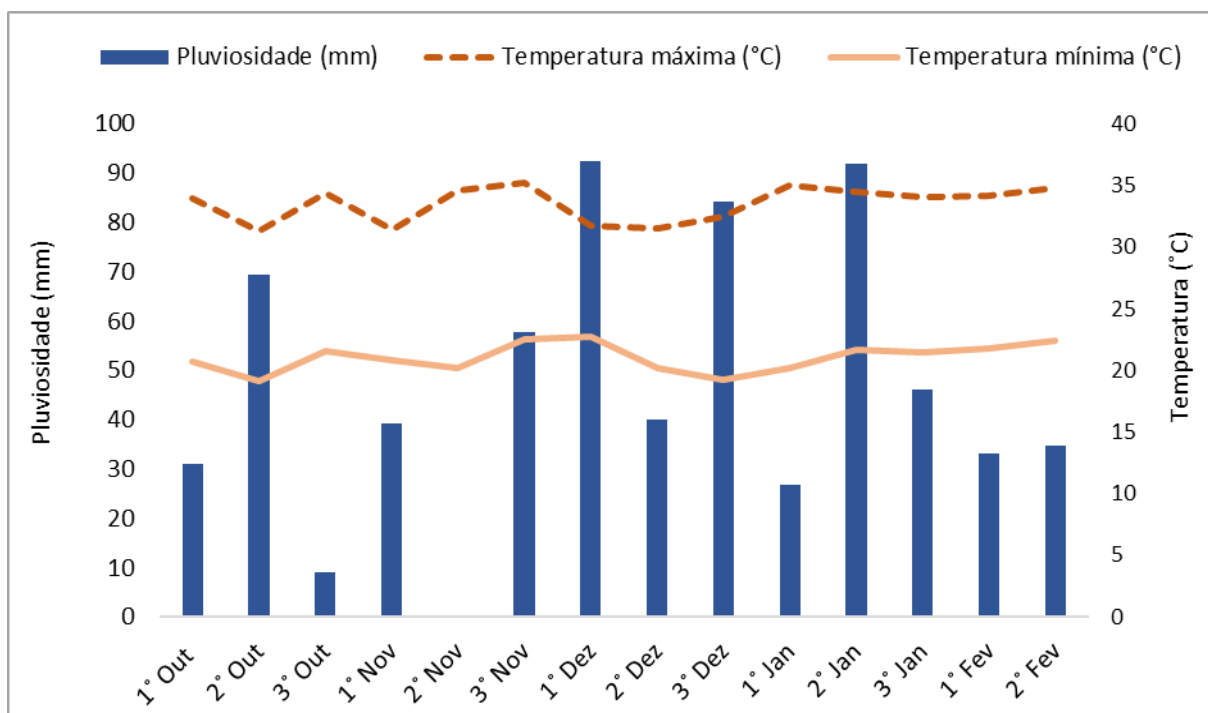


Figura 1 - Precipitação pluviométrica, temperaturas máximas e mínimas médias diárias, em decêndios registradas durante o cultivo da soja safra 2024/25. Dourados, MS, 2026. Fonte: Guia Clima, estação - Embrapa - Dourados/MS.

2.2. Histórico da área

Em março de 2020 foram aplicadas quatro toneladas de calcário dolomítico seco por hectare, visando elevar a saturação por bases a 70% na camada de 0–20 cm, além de três toneladas de gesso por hectare. Os corretivos foram incorporados por meio dos três manejos de solo que compõem os tratamentos deste trabalho, com exceção do sistema plantio direto, no qual não houve incorporação dos corretivos.

O arado de aivecas, equipado com duas aivecas, operou à profundidade de 25 cm; o arado de discos, com três discos, operou à profundidade de 17 cm; e o escarificador, com sete hastes, operou à profundidade de 27 cm. Os implementos foram tracionados por um trator com potência de 141 cv.

No outono-inverno de 2020 e 2021 foi cultivado consórcio milho-braquiária, e a soja semeada nas safras de verão 2020/2021 e 2021/2022. Em 2022, 2023 e 2024 foram semeadas culturas de cobertura no outono-inverno e no verão a soja 2022/2023, 2023/2024, correspondendo aos tratamentos de cultivos do presente trabalho.

2.3. Delineamento Experimental

O estudo foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 4x4 e três repetições. Cada parcela com dimensões de 27 m de comprimento por 12 m de largura. O primeiro fator (parcelas) foi constituído pelos sistemas de manejo do solo realizados em março de 2020: (1) arado de discos; (2) arado de aivecas; (3) escarificador; e (4) plantio direto. O segundo fator (subparcelas) foi composto por quatro cultivos de outono-inverno: (1) milho (*Zea mays* L.); (2) milho + *Brachiaria ruziziensis*; (3) *B. ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca*; e (4) mix de plantas (milho + *B. ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + feijão-mungo (*Vigna radiata* L.)).

2.4. Implantação dos cultivos de outono-inverno

Os cultivos de outono-inverno foram semeados em 16 fevereiro de 2024, em linhas de 45 cm entre si, com 12 kg ha⁻¹ de N, 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O.

O híbrido de milho K7500 VIP 3 foi semeado nos três tratamentos, para uma população final de 60 mil plantas ha⁻¹. A semeadura da *B. ruziziensis*, foi realizada utilizando a terceira caixa da semeadora, ajustada para obter a população de 10 plantas de braquiária m². No consórcio *B. ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca*, as sementes foram homogeneizadas para a semeadura, e utilizou-se a terceira caixa da semeadora. No mix de plantas, as sementes de milho foram adicionadas no compartimento próprio, e para as sementes das demais espécies foi utilizado a terceira caixa. Todas as espécies foram semeadas na mesma operação de semeadura do milho, utilizando 4 kg ha⁻¹ de sementes de braquiária, 2 kg ha⁻¹ de crotalaria e 2 kg ha⁻¹ de feijão-mungo.

Para controle de insetos pragas foi realizada uma aplicação de Acefato aos 15 dias após a emergência do milho, na dose de (800 g p.c./ha⁻¹). Nos tratamentos, milho e milho + *Brachiaria ruziziensis*, foi realizada aplicação do herbicida Atrazina na dose de (1,5 L ha⁻¹) no estágio V5 do milho para controle de plantas invasoras. Em junho de 2024, as plantas dos tratamentos mix e do consócio de *B. ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* foram avaliadas e, posteriormente, tritonadas para atender ao vazio sanitário da soja.

No dia 30 de setembro de 2024 foi realizada a dessecação das plantas de cobertura, e na data de 01 de outubro de 2024 foi realizado a coleta dos resíduos vegetais dessas plantas em uma área de 1 m², com o corte das plantas rente ao solo. Subamostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 60 °C por 72 horas, e pesadas para obter a massa seca das plantas. A massa

seca total dos resíduos das plantas de milho, milho + braquiária, braquiária + crotalária e mix de plantas foram: 12.477, 11.693, 8.417 e 8.821 kg ha⁻¹ respectivamente.

2.5. Implantação da cultura da soja

A cultivar de soja BRS 1064 IPRO foi semeada em 04 de outubro de 2024, utilizando uma semeadora Tatu Marchesan PST4, 28 dias após a dessecação dos cultivos com glifosate (1,44 L do equivalente ácido ha⁻¹). No sulco de semeadura foram aplicados 12 kg⁻¹ ha⁻¹ de N, 54 kg⁻¹ ha⁻¹ de P₂O₅ e 54 kg⁻¹ ha⁻¹ de K₂O, com espaçamento entre linhas de 0,45m, profundidade de semeadura 4 cm e população final de 235.358 plantas por hectare. As sementes foram inoculadas no momento da semeadura com 2,5 mL de *Bradyrhizobium japonicum* por kg⁻¹ de semente.

A cultivar BRS 1064IPRO do Grupo de maturidade 6.4 é indicada para áreas de média a alta fertilidade. Possui resistência às principais doenças que atacam lavouras de soja, em especial a Podridão Radicular de *Phytophthora*, resistência ao nematoide de cisto (*Heterodera glycines*) (raça 3) e moderada resistência ao nematoide de galhas (*Meloidogyne javanica*).

Para o controle de plantas infestantes em pós emergência, foi aplicado 0,74 L ha⁻¹ do equivalente ácido de glifosato em 12 de novembro de 2024. No dia 11 de dezembro de 2024 foi aplicado Difenconazol e Ciproconazol (0,3 L p.c. ha⁻¹) para controle de doenças, e para o controle de pragas foi aplicado Tiametoxam e Lambda-cialotrina (200 ml p.c. ha⁻¹).

2.6. Avaliações

2.6.1. Atributos químicos do solo

Em outubro de 2024, na pré-semeadura da soja, utilizando um trado de corte tipo holandês, foram coletadas quatro subamostras de solo nas profundidades 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm do solo, as amostras simples foram homogeneizadas formando uma amostra composta representativa de cada uma das quatro camadas. As amostras foram analisadas utilizando a metodologia descrita por Silva (2009), no Laboratório de Análise de solo da Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados, MS.

2.6.2. Atributos microbiológicos do solo

No dia 26 de novembro de 2024 quando a soja estava em R1, foi coletado com auxílio de um trado uma amostra (500 g), composta por 4 subamostras de solo, na camada 0–10 cm para análise dos atributos microbiológicos do solo. As amostras de solo foram peneiradas em malha de 2 mm para remoção de raízes e resíduos vegetais. Posteriormente, o solo foi ajustado para umidade entre 40 e 60% da capacidade de campo com água destilada e mantido em recipiente hermético por 24 h para reativação da atividade microbiana.

O carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS) foi determinado pelo método de fumigação-extração descrito por Vance et al., (1987). Foram utilizadas seis subamostras de 20 g por amostra de solo, sendo três fumigadas com clorofórmio (CHCl_3) por 24 h em dessecador sob vácuo e três não fumigadas. Após a fumigação, o carbono foi extraído com solução de K_2SO_4 0,5 mol L^{-1} (relação solo: extrator de 1:2,5), seguido de agitação por 30 min e filtração. O carbono presente nos extratos foi determinado por espectrofotometria a 495 nm após reação com solução oxidante. O C-BMS foi calculado pela diferença entre o carbono extraído das amostras fumigadas e não fumigadas, utilizando fator de correção ($K_c = 0,33$).

A respiração basal do solo (C- CO_2) foi determinada pelo método de incubação alcalina proposto por Jenkinson e Powlson (1976). Amostras de 50 g de solo foram incubadas por sete dias em recipientes hermeticamente fechados contendo solução de NaOH 1 mol L^{-1} para captura do CO_2 liberado. Após a incubação, o CO_2 absorvido foi precipitado com BaCl_2 (10%) e titulado com solução de HCl 0,5 mol L^{-1} na presença de fenolftaleína. Os resultados foram expressos em μg de C- CO_2 g^{-1} de solo dia^{-1} .

O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) foi calculado pela relação entre a respiração basal (C- CO_2) e o carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS), conforme proposto por Anderson e Domsch, (1990).

Foram avaliadas três enzimas do solo envolvidas na ciclagem de nutrientes provenientes da matéria orgânica: fosfatase ácida, relacionada à mineralização e disponibilização de fósforo; β -glicosidase, associada ao ciclo do carbono por atuar na degradação de carboidratos; e arilsulfatase, responsável pela mineralização de compostos orgânicos contendo enxofre e liberação de sulfato. As determinações foram realizadas conforme metodologias descritas por Tabatabai e Bremner (1969) para fosfatase ácida, Eivazi e Tabatabai (1988) para β -glicosidase e Tabatabai e Bremner (1970) para arilsulfatase.

As atividades enzimáticas foram determinadas utilizando substratos específicos para cada enzima: p-nitrofenil fosfato para fosfatase ácida, p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo para β -glicosidase e p-nitrofenil sulfato para arilsulfatase. Após a incubação das amostras com os respectivos substratos, a atividade enzimática foi quantificada por espectrofotometria a partir

da liberação de p-nitrofenol (PNP). denominadas controles, ou seja, o solo sem o substrato da respectiva enzima.

2.6.3. Avaliações na soja

No dia 8 de janeiro de 2025, quando as plantas de soja estavam no estágio reprodutivo R6, foram coletadas quatro plantas por parcela, onde foi avaliado a altura de plantas, massa seca total, número de nódulos por planta e massa seca de nódulos por planta.

A altura das plantas foi mensurada com o auxílio de uma régua. A massa seca total foi determinada pela soma das massas secas das frações da planta (caule, folhas e vagens), após secagem em estufa de ventilação forçada à 60 °C por 72 horas. Para a quantificação do número de nódulos por planta, os nódulos foram destacados das raízes, contados e posteriormente submetidos à secagem em estufa para obtenção da massa seca.

A colheita foi realizada em 28/01/25, colhendo as plantas de duas linhas centrais de dois m de comprimento, sendo a população e a altura de plantas determinadas por contagem e medição das plantas na área útil, respectivamente.

Em seguida, quatro plantas de cada parcela foram separadas para a contagem do número de vagens por planta e do número de grãos por vagem, além da determinação da massa de 100 grãos. Antes da trilha mecânica, as plantas colhidas foram pesadas para cálculo da massa de hastes. Posteriormente, os grãos foram separados por meio de trilhadora mecânica do tipo Wintersteiger, sendo então pesados para obtenção do peso de grãos. A produtividade de grãos foi calculada com base no peso de grãos corrigido para 13% de umidade.

2.6.4. Análise estatística

Os dados foram submetidos à normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett, ambos a 5% de significância. Quando os pressupostos foram atendidos, procedeu-se à análise de variância ($p \leq 0,05$) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, utilizando-se o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2019).

Foi realizada análise de correlação linear simples entre as variáveis avaliadas, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (r). A significância dos coeficientes foi testada pelo teste t de Student, adotando-se os níveis de 10% e 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram conduzidas no software SAEG – Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Atributos químicos do solo

Observou-se um efeito residual dos manejos realizados em 2020 na implantação do projeto, sobre os teores de matéria orgânica do solo (Tabela 2), houve efeito de manejo de solo apenas na camada 20–30 cm, sendo o plantio direto (21,78 g dm⁻³) superior ao arado de discos (19,61 g dm⁻³), sem diferir do arado de aivecas e do escarificador. A ausência de efeitos nas camadas 0–10 e 10–20, indicam que os manejos de solo realizados a aproximadamente cinco anos, não interferiram de forma isolada sobre os teores de MO no solo, isto porquê no período de cinco anos, o fornecimento de resíduos vegetais pelos cultivos e a ausência de revolvimento no solo, foram suficientes para manter níveis adequados de MO nessas camadas do solo.

O rompimento dos bioporos causado pelo arado de discos na profundidade de trabalho (17 cm) pode ter diminuído o crescimento das raízes na camada 20–30 cm, enquanto que no plantio direto os bioporos permaneceram inalterados, facilitando o crescimento de raízes e consequente deposição de matéria orgânica (Roper et al., 2015). Para cultivos de outono-inverno não houve diferença entre os tratamentos indicando estabilidade nos teores de matéria orgânica independente do cultivo, no entanto é importante destacar que estes valores são provenientes de um solo, em plantio direto, com bom aporte de matéria orgânica em todos os cultivos (Silva et al., 2022).

Tabela 2 - Teores de matéria orgânica no solo (g dm⁻³), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo realizados em 2020, e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	Camadas do solo (cm)							
	0–10		10–20		20–30		30–40	
Arado de aivecas	32,98	a	24,75	a	20,79	ab	17,30	a
Escarificador	33,62	a	22,41	a	20,44	ab	17,85	a
Plantio direto	33,56	a	24,25	a	21,78	a	18,02	a
Arado de discos	34,75	a	22,92	a	19,61	b	16,55	a
Cultivos de outono-inverno								
Milho	33,23	a	23,78	a	21,01	a	17,92	a
Milho + braquiária	34,57	a	22,82	a	20,55	a	17,48	a

Braquiária + crotalária	33,26	a	24,21	a	20,77	a	17,37	a
Mix	33,85	a	23,53	a	20,28	a	16,94	a
C.V. (%)	8,32		10,78		8,54		10,96	
Média geral	33,73		23,58		20,66		17,43	

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária ruziziensis + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

Os teores de fósforo na camada 10–20 cm do solo, diferiram em função dos manejos de solo realizados em 2020 (Tabela 3), nesta camada 10–20 cm os teores de fósforo foram maiores no manejo com arado de discos ($24,96 \text{ mg dm}^{-3}$) comparativamente ao plantio direto ($15,29 \text{ mg dm}^{-3}$), mas sem diferir do escarificador e arado de aivecas, o maior teor de P no manejo com arado de discos pode estar relacionado à profundidade de trabalho (17 cm) deste implemento, colocando o fósforo da camada 0–10 cm para a camada 10–20 cm. Apesar do valor de P observado no plantio direto na camada 10–20 cm do solo ser inferior ao observado no arado de discos, ambos são considerados valores altos segundo Sousa e Lobato (2004), que estabelece como alto teores de $P > 12 \text{ mg dm}^{-3}$, em análises que o fósforo é extraído pelo método Mehlich-1, para recomendação de adubação fosfatada em sistemas de sequeiro com culturas anuais, em solos com teores de argila entre 36 a 60%.

Tabela 3 - Teores de fósforo no solo (mg dm^{-3}), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo realizados em 2020, e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	Camadas do solo (cm)							
	0–10		10–20		20–30		30–40	
Arado de aivecas	34,61	a	22,36	ab	10,69	a	3,82	a
Escarificador	34,64	a	20,11	ab	10,76	a	5,53	a
Plantio direto	43,61	a	15,29	b	8,84	a	4,61	a
Arado de discos	45,48	a	24,96	a	10,71	a	5,10	a
Cultivos de outono-inverno								
Milho	36,31	ab	19,68	a	10,25	a	4,87	a
Milho + braquiária	30,83	b	17,20	a	8,92	a	4,20	a
Braquiária + crotalária	46,54	a	24,45	a	12,24	a	5,38	a
Mix	44,66	ab	21,40	a	9,60	a	4,62	a
C.V. (%)	33,83		39,95		39,78		41,69	

Média geral	39,59	20,68	10,25	4,77
-------------	-------	-------	-------	------

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária ruziziensis + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

Em relação aos cultivos de outono-inverno, houve diferença nos teores de fósforo apenas na camada 0–10 cm, não sendo observadas diferenças nas demais profundidades avaliadas. Em braquiária + crotalaria os teores de P observados ($46,54 \text{ mg dm}^{-3}$) foram superiores ao observado em milho + braquiária ($30,83 \text{ mg dm}^{-3}$), sem diferir do mix de plantas e do milho (Tabela 3).

O aumento dos teores de fósforo na camada superficial pode estar relacionado à capacidade das plantas de cobertura em liberar ao solo ácidos orgânicos por meio da exsudação radicular e da decomposição da palhada (Almeida et al., 2020). De acordo com Sakib et al., (2025), esses exsudatos podem aumentar a disponibilidade de P no solo ao promover a dessorção do fósforo fixado, seja pela formação de complexos estáveis com Fe e Al ou pela dissolução de oxihidróxidos desses elementos. Além disso, os ácidos orgânicos competem diretamente com o fósforo pelos mesmos sítios de adsorção, favorecendo a manutenção do P em formas mais lábeis no solo. O manejo antecipado no consórcio braquiária + crotalaria com trituração dos resíduos vegetais, pode ter intensificado este efeito, favorecendo a liberação de P para a solução do solo. Em contraste, no cultivo milho + braquiária, a ausência desse manejo e o crescimento contínuo da braquiária até a dessecação podem ter contribuído para maior imobilização temporária do fósforo na biomassa vegetal.

A restrição das diferenças à camada 0–10 cm reforça que essa camada é a mais sensível às alterações promovidas pelos sistemas de cultivo e manejo do solo. Nessa camada concentram-se as principais reações do calcário, maior densidade de raízes, maior deposição e decomposição de palhada, além da aplicação superficial de fertilizantes, fatores que intensificam a dinâmica do fósforo no sistema solo-planta (Tiecher et al., 2023).

Os teores de potássio no solo diferiram em função de manejos de solo na camada 0–10 cm, sem diferir nas demais camadas avaliadas. Não houve diferenças para o nutriente em função de cultivos de outono-inverno nas camadas de solo avaliadas (Tabela 4).

Na camada 0–10 cm, o teor de potássio no solo manejado com arado de discos ($0,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi superior ao arado de aivecas ($0,58 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e escarificador ($0,58 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), não diferindo, entretanto, do plantio direto ($0,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os manejos com arado de aivecas, escarificador e plantio direto não diferiram entre si.

Tabela 4 - Teores de potássio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), nas camadas 0 -10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	Camadas do solo (cm)							
	0–10		10–20		20–30		30–40	
Arado de aivecas	0,58	b	0,37	a	0,22	a	0,12	a
Escarificador	0,58	b	0,38	a	0,22	a	0,13	a
Plantio direto	0,63	ab	0,36	a	0,25	a	0,17	a
Arado de discos	0,80	a	0,36	a	0,26	a	0,14	a
Cultivos de outono-inverno								
Milho	0,60	a	0,33	a	0,23	a	0,14	a
Milho + braquiária	0,64	a	0,31	a	0,20	a	0,14	a
Braquiária + crotalaria	0,66	a	0,37	a	0,24	a	0,14	a
Mix	0,69	a	0,45	a	0,27	a	0,13	a
C.V. (%)	24,03		44,54		54,88		39,68	
Média geral	0,65		0,37		0,24		0,14	

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária *ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

Os maiores teores de potássio observados na camada superficial do solo que recebeu incorporação de calcário e gesso em 2020 com o uso do arado de discos, indicam que a incorporação mais eficiente de corretivos favoreceu a disponibilidade do nutriente no solo, de acordo com TSHUMA et al., (2021) práticas agrícolas convencionais, como o revolvimento do solo por meio da aração, contribuem para uma distribuição mais homogênea dos nutrientes no solo.

A homogeneização de corretivos de solo contribui para o aumento da capacidade de troca catiônica efetiva, reduzindo a mobilidade do K^+ e, consequentemente, as perdas por lixiviação, especialmente em solos altamente intemperizados (Wenyika et al., 2025). Em contraste, implementos como o arado de aivecas que promovem reversão parcial da camada do solo, podem intensificar a exposição da matéria orgânica à oxidação, acelerando sua decomposição (Silva et al., 2021), e reduzindo a capacidade de troca catiônica do solo (Stevenson, 1994; Brady e Weil, 2017). De forma semelhante, o manejo com escarificador,

caracterizado por menor incorporação de corretivos, limita a reação do calcário no solo e CTC (Monteiro et al., 2017).

Já no plantio direto, o comportamento intermediário observado, foi possivelmente em função da ciclagem biológica do potássio via resíduos vegetais mantidos na superfície, uma vez que o nutriente é rapidamente liberado da biomassa e tende a se acumular nas camadas superficiais (Rosolem et al., 2010; Rheinheimer et al., 1998).

A ausência de diferenças nos teores de potássio nas camadas subsuperficiais reforça que os efeitos dos manejos de solo sobre a dinâmica desse nutriente são predominantemente superficiais, concentrando-se na zona de maior deposição de resíduos e aplicação de fertilizantes. Além disso, a inexistência de efeito dos cultivos de outono-inverno indica que, todos os cultivos foram eficientes em promover alterações nos teores do nutriente no solo.

Os teores de cálcio no solo foram influenciados pelos manejos de solo exclusivamente na camada 30–40 cm (Tabela 5), evidenciando que esse nutriente respondeu de maneira mais pronunciada às práticas que promovem maior redistribuição vertical dos corretivos no perfil do solo. O manejo com o arado de discos, teve maior teor de cálcio ($3,54 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em comparação ao arado de aivecas ($2,86 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto nos demais manejos os valores obtidos foram intermediários. As diferenças observadas apenas na camada 30–40 demonstram que devido ao alto valor nas camadas superficiais, o revolvimento do solo não afetou a disponibilidade do nutriente nestas camadas.

Tabela 5 - Teores de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	Camadas do solo (cm)							
	0–10		10–20		20–30		30–40	
Arado de aivecas	5,53	a	5,33	a	3,83	a	2,86	b
Escarificador	5,06	a	4,94	a	3,76	a	3,28	ab
Plantio direto	5,77	a	4,75	a	3,95	a	3,14	ab
Arado de discos	5,57	a	5,51	a	4,34	a	3,54	a
Cultivos de outono-inverno								
Milho	5,54	a	5,18	a	4,07	a	3,22	a
Milho + braquiária	5,41	a	5,06	a	4,14	a	3,34	a
Braquiária + crotalária	5,54	a	5,20	a	3,79	a	3,13	a
Mix	5,45	a	5,10	a	3,88	a	3,18	a

C.V. (%)	12,49	16,72	17,59	14,79
Média geral	5,48	5,13	3,97	3,21

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária ruziziensis + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

O cálcio possui moderada mobilidade no solo, pois fica adsorvido nas cargas negativas de argila e matéria orgânica, isso faz com que sua movimentação vertical seja limitada em solos que apresentam altos teores de MO como observado no presente estudo (Tabela 2). A movimentação do Ca ocorre principalmente por lixiviação ou redistribuição física do solo (Michalovicz et al., 2014). O arado de discos promove maior homogeneização da camada arável, favorecendo a distribuição do calcário no solo, como verificado por Demattê e Demattê (2024). Essa condição intensifica o contato do corretivo com o solo, acelerando suas reações químicas e a neutralização da acidez na camada superficial. Quando associado à aplicação de gesso agrícola, a homogeneização dos corretivos favorece o movimento descendente do Ca, uma vez que o gesso atua como fonte de cálcio solúvel (CaSO_4) e possui maior mobilidade no perfil, contribuindo para o aumento dos teores do nutriente em camadas subsuperficiais (Fernandes et al., 2020).

Em contraste, o arado de aivecas, embora realize a inversão parcial da camada de solo trabalhada, não promove adequada homogeneização dos corretivos, resultando em distribuição menos uniforme do calcário (Silva et al., 2021). Essa limitação pode reduzir a eficiência das reações químicas do corretivo e, conseqüentemente, restringir o fornecimento de cálcio às camadas mais profundas do solo, o que explica os menores teores observados na camada de 30–40 cm nesse manejo.

A ausência de efeito significativo dos cultivos de outono-inverno sobre os teores de cálcio em todas as camadas avaliadas indica que, no período considerado, as espécies utilizadas foram eficientes na redistribuição desse nutriente nas camadas avaliadas.

Os teores de magnésio diferiram significativamente em função de manejos de solo apenas na camada 10–20 cm. No manejo com arado de aivecas o teor de magnésio ($1,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi superior ao plantio direto ($1,48 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sem diferir de arado de discos e escarificador ($1,59 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), (Tabela 6).

Tabela 6 - Teores de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), nas camadas 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	Camadas do solo (cm)							
	0–10		10–20		20–30		30–40	
Arado de aivecas	1,82	a	1,85	a	1,35	a	1,01	a
Escarificador	1,84	a	1,59	ab	1,19	a	1,01	a
Plantio direto	1,93	a	1,48	b	1,28	a	1,05	a
Arado de discos	1,81	a	1,69	ab	1,27	a	1,07	a
Cultivos de outono-inverno								
Milho	1,77	a	1,68	a	1,33	a	1,04	a
Milho + braquiária	1,81	a	1,64	a	1,30	a	1,07	a
Braquiária + crotalária	1,94	a	1,60	a	1,17	a	0,85	a
Mix	1,88	a	1,70	a	1,30	a	1,08	a
C.V. (%)	11,21		16,47		19,50		20,04	
Média geral	1,85		1,65		1,27		1,04	

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária *ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

A mobilidade do magnésio em solo sob plantio direto é influenciada pela dinâmica de lixiviação e pelo acúmulo de matéria orgânica (Gransee e Fühns 2013), neste sistema há uma tendência de concentração significativa do magnésio em superfície devido ao não revolvimento no solo (Demattê e Demattê 2024; Mühlbachová et al., 2024), dificultando que o magnésio adicionado ao solo desça para as camadas mais profundas. Já no arado de aivecas, ocorreu inversão parcial do solo, proporcionando que parte do magnésio presente na superfície do solo fosse depositado na camada 10–20cm, Mühlbachová et al. (2024) observaram aumento nos teores de magnésio em superfície em plantio direto quando comparado ao uso de arado de aivecas.

3.2. Atividade microbiana do solo

Os diferentes métodos de preparo do solo adotados em 2020 na implantação do plantio direto, não apresentaram diferenças para os atributos microbiológicos (C-BMS, C-CO₂, qCO₂ e qMic) avaliados em 26 de novembro de 2024, indicando que, nas condições do experimento,

nenhum manejo se destacou de forma isolada na melhoria da biomassa microbiana ou de sua atividade (Lori et al., 2017). Apesar disso, observa-se uma tendência de maiores valores de C-BMS e C-CO₂ nos manejos em que houve incorporação dos corretivos no solo em 2020, especialmente no arado de discos e no escarificador, enquanto o plantio direto apresentou valores ligeiramente inferiores. A incorporação de corretivos pode melhorar o pH, a disponibilidade de nutrientes e a estabilidade estrutural do solo, criando condições mais favoráveis para o restabelecimento e a atividade da microbiota (Franchini et al., 2007).

Tabela 7 - Atributos microbiológicos, na profundidade 0–10 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, no florescimento (R1) da soja. Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	C-BMS ($\mu\text{g C g}^{-1}$)	C-CO₂ ($\mu\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)	qCO₂ ($\mu\text{CO}_2/\mu\text{g C-}$ mic h^{-1})	qMic (%)
Arado de aivecas	216,31 a	13,89 a	31,27 a	1,11 a
Escarificador	268,72 a	20,07 a	40,90 a	1,41 a
Plantio direto	207,22 a	13,62 a	38,04 a	1,06 a
Arado de discos	280,72 a	19,98 a	30,27 a	1,38 a
Cultivos de outono-inverno				
Milho	234,55 a	15,82 ab	29,80 a	1,21 a
Milho + braquiária	247,42 a	16,65 ab	29,37 a	1,23 a
Braquiária + crotalária	243,26 a	21,02 a	41,95 a	1,24 a
Mix	247,75 a	14,07 b	29,38 a	1,27 a
C.V. (%)	32,35	34,78	57,79	33,24
Média geral	243,24	16,90	32,62	1,24

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (C-BMS) = carbono da biomassa microbiana; (C-CO₂) = respiração microbiana; (qCO₂) = quociente metabólico; (qMic %) = quociente microbiano; (Mix) = Milho + Braquiária *ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

A respiração microbiana apresentou diferença significativa entre os sistemas de cultivo. O consórcio braquiária+crotalária apresentou a maior respiração microbiana ($21,02 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), superando o mix de plantas de cobertura ($14,07 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) (Tabela 7). Os tratamentos milho solteiro, milho + braquiária e braquiária + crotalária não diferiram significativamente entre si, assim como não houve diferença entre milho solteiro, milho + braquiária e o mix de plantas de cobertura.

A decomposição acelerada dos resíduos vegetais aumenta o valor da respiração microbiana (Dadalto et al., 2015; Congreves et al., 2015), o alto valor de C-CO₂ no consórcio de braquiária com crotalária pode estar relacionado com a rápida decomposição dos resíduos de crotalária devido sua baixa relação C/N (Congreves et al., 2015), somado ao fato de que seu valor de massa seca (1.604 kg⁻¹ ha⁻¹) representa parte considerável da massa seca total do tratamento 19,05%.

C-BMS, qC-CO₂ e qMic não tiveram efeito significativo para os sistemas de cultivo estudados (Tabela 7), indicando que o sistema agrícola apresenta relativa estabilidade biológica, com condições adequadas de matéria orgânica e disponibilidade de substrato para manutenção da biomassa microbiana (Anderson e Domsch, 1993).

3.3. Atividade enzimática

A atividade da β -glicosidase na camada 0–10 cm foi influenciada pelos manejos de solo (Tabela 8), com maior valor observado no manejo com escarificador, o qual diferiu do plantio direto, enquanto os manejos com arado de aivecas e arado de discos apresentaram valores intermediários. A β -glicosidase está diretamente relacionada ao ciclo do carbono, atuando na degradação da celulose e refletindo a atividade microbiana e a disponibilidade de carbono lábil no solo (Mendes et al., 2021). O maior valor observado no manejo com escarificador, pode ser atribuído ao rompimento das camadas compactadas do solo que favorece a aeração e a redistribuição dos resíduos orgânicos (Silva et al., 2021), estimulando a atividade microbiana sem causar perturbação excessiva dos agregados.

Em contrapartida, o menor valor observado no plantio direto pode estar associado à menor taxa de decomposição, à maior estratificação da matéria orgânica e ao reduzido contato entre microrganismos e substratos orgânicos na camada avaliada, dificultando a atuação enzimática (Souza et al., 2011; Ilka et al., 2024). Além disso, a redução na relação CBM/COS em plantio direto observada por Ilka et al. (2024) indica menor proporção de carbono ativo na biomassa microbiana em relação ao carbono orgânico total, sugerindo limitação na disponibilidade de carbono lábil para os microrganismos. Esse cenário contribui para menor síntese de enzimas extracelulares, como a β -glicosidase, uma vez que sua produção está diretamente ligada à demanda microbiana por substratos energéticos facilmente assimiláveis (Nannipieri et al., 2018; Piton et al., 2020).

Tabela 8 - Atividade enzimática do solo, na camada 0–10 cm, após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, no florescimento (R1) da soja. Dourados, MS, 2026.

	β-glicosidase	Arilsulfatase	Fosfatase ácida
Manejos de solo	----- mg p-nitrofenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹ -----		
Arado de aivecas	127,43 ab	89,12 b	640,38 a
Escarificador	154,00 a	74,17 b	567,77 ab
Plantio direto	107,70 b	119,09 a	553,29 b
Arado de discos	150,27 ab	67,00 b	587,95 ab
Cultivos de outono-inverno			
Milho	123,97 a	77,87 a	572,50 a
Milho + braquiária	125,87 a	100,84 a	598,01 a
Braquiária + crotalária	149,00 a	95,08 a	597,56 a
Mix	140,55 a	75,57 a	581,33 a
C.V. (%)	29,64	30,66	12,03
Média geral	134,85	87,34	587,35

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária *ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

A atividade da enzima Arilsulfatase no plantio direto (119,09 mg p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹) foi superior aos outros manejos de solo. Arado de aivecas, escarificador e arado de discos não diferiram entre si, com as médias de (89,12; 74,17 e 67 mg p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹) respectivamente. Este resultado corrobora com o obtido por Lisboa et al., (2012) ao avaliarem a atividade da enzima Arilsulfatase em campo natural, plantio convencional e plantio direto, no qual os manejos em que não havia revolvimento do solo apresentaram maior atividade da enzima. Isto pode estar ligado ao estoque de carbono que de modo geral, é maior em solos que não são revolvidos, pois possuem maior teor de matéria orgânica, maior atividade microbiana e maior quantidade de compostos orgânicos contendo enxofre, que servem de substrato para essa enzima, Haynes (1999) observou alta correlação positiva entre a atividade da arilsulfatase e o estoque de C no solo.

Para a fosfatase ácida, houve diferença significativa em função de manejos de solo. Arado de aivecas (640,38 mg p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹) foi superior ao plantio direto (553,29 mg p-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹) ambos não diferiram dos demais tratamentos. A menor atividade

da enzima observada no sistema plantio direto pode ter ligação à maior disponibilidade, e ao alto teor de fósforo presente na camada 0–10 cm, isto porque a adubação fosfatada exerce grande influência sobre sua atividade, segundo Alves et al., (2011) a atividade da fosfatase ácida pode ser reduzida por altos teores de P no solo.

3.4. Produtividade da soja

No estágio R6 da soja, a massa seca total foi maior no manejo com arado de discos (4.738 kg ha⁻¹) em comparação ao plantio direto (3.519 kg ha⁻¹) e ao arado de aivecas (3.095 kg ha⁻¹), não diferindo do escarificador (4.487 kg ha⁻¹) (Tabela 9), entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre os manejos de solo para a massa seca de hastes e a produtividade (Tabela 11), sugerindo maior contribuição da massa foliar nas parcelas manejadas com arado de discos, compatível com o estágio R6, fase caracterizada pela remobilização de fotoassimilados e nutrientes das folhas e caules para os grãos em enchimento, associada à senescência foliar (Islam et al., 2016; Gaspar et al., 2017).

Tabela 9 - Variáveis da soja (R6) após manejos de solo e cultivos de outono-inverno. Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	Massa seca total kg ha ⁻¹	Número de nódulos por planta	Massa seca de nódulos por planta (mg)
Arado de aivecas	3.095 c	113 bc	243,10 b
Escarificador	4.487 ab	176 a	503,41 a
Plantio direto	3.519 bc	93 c	216,60 b
Arado de discos	4.738 a	156 ab	353,19 b
Cultivos de outono-inverno			
Milho	4.004 a	159 a	388,67 a
Milho + braquiária	4.331 a	132 a	323,10 a
Braquiária + crotalária	3.811 a	122 a	306,54 a
Mix	3.693 a	125 a	297,97 a
C.V. (%)	26,70	33,94	39,38
Média geral	3.959,82	134,66	329,10

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária ruziziensis + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

Foi observado efeito residual dos manejos de solo realizados na implantação do sistema plantio direto em 2020, sobre a nodulação da soja. O maior número de nódulos por planta e a maior massa seca de nódulos observados no tratamento em que se usou o escarificador, indicam que o manejo pode ter proporcionado melhoria das condições físicas do solo, como redução da resistência mecânica e aumento da aeração, favorece o crescimento radicular e a colonização por *Bradyrhizobium* (Siczek; Lipiec, 2011). A escarificação mecânica promove a desagregação de camadas compactadas, aumentando a macroporosidade e reduzindo a resistência do solo à penetração radicular, fatores que favorecem a formação e o desenvolvimento de nódulos na soja (Tormena et al., 2007; Silva-Abud et al., 2021).

Embora o plantio direto seja frequentemente associado a melhorias na fixação biológica de nitrogênio em sistemas consolidados, neste estudo observou-se menor número de nódulos nesse manejo em comparação ao arado de discos e ao escarificador. Esse resultado pode estar relacionado à presença de compactação subsuperficial, comum em áreas de plantio direto, o que limita a infecção radicular por rizóbios (Siczek; Lipiec, 2011).

Em relação a população de plantas, número de vagens por planta e número de grãos por vagem, os manejos de solo e os sistemas de cultivos, não influenciaram nas médias dessas variáveis (Tabela 10), já a massa de 100 grãos sofreu efeito isolado em função de manejos de solo.

A massa de 100 grãos foi maior no manejo com arado de discos em relação ao escarificador e ao plantio direto, não diferindo do arado de aivecas. Esse resultado pode estar associado a maior massa seca total observada nesse manejo no estágio R6 (Tabela 9), indicando maior aporte de fotoassimilados para o enchimento dos grãos. Adicionalmente, a incorporação mais profunda de calcário e gesso pelo arado de discos, que pode ter favorecido as condições físicas e químicas do solo, com maior infiltração de água, fornecimento de cálcio, redução da acidez potencial e melhor distribuição radicular no perfil do solo (Freitas et al., 2016).

Tabela 10 - Componentes de produtividade da soja após manejos de solo, Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	População de plantas (m ²)	Número de vagens por planta	Número de grãos por vagem	Massa de 100 grãos (g)
Arado de aivecas	24,12 a	61,5 a	1,86 a	11,91 ab

Escarificador	23,85 a	74,1 a	1,60 a	11,37 b
Plantio direto	22,48 a	67,6 a	1,88 a	11,31 b
Arado de discos	23,67 a	63,8 a	1,63 a	12,77 a
C.V. (%)	8,53	18,7	18,8	6,88
Média geral	23,53	66,8	1,74	11,86

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$).

A altura de plantas no plantio direto (71,00 cm) foi superior ao escarificador (66,42 cm) sem diferir de arado de aivecas (68,33 cm) e arado de discos (67,58 cm) (Tabela 11). No plantio direto por não haver revolvimento do solo, ocorre preservação da estrutura do solo e decomposição mais lenta da matéria orgânica, fazendo com que a água permaneça por mais tempo disponível para as plantas, permitindo um bom desenvolvimento do sistema radicular e porte elevado das plantas (Araújo, 2019; Silva et al., 2022). Por outro lado, manejos de solo com o uso do arado de discos e arado de aivecas permitem incorporação de corretivos de solo o que pode favorecer o desenvolvimento das plantas principalmente em anos com chuvas regulares (Sithole; Mafongoya, 2016).

A massa de hastes e a massa de grãos da soja não diferiram em função dos manejos de solo e dos cultivos de outono-inverno. De modo geral, os manejos de solo, realizados em março de 2020, promoveram alterações nos atributos químicos e microbiológicos, especialmente na camada 10–20 cm, com reflexos na dinâmica do fósforo, na atividade enzimática e na nodulação da soja. Entretanto, essas alterações não implicaram em diferenças na produtividade da soja, indicando que o sistema se encontra estabilizado. Assim, os efeitos observados ao longo do estudo fornecem contribuições importantes para compreender a necessidade e o impacto das operações mecânicas no solo para implantação do sistema plantio direto.

Tabela 11 - Altura de plantas na colheita, massa de hastes e produtividade de grãos após manejos de solo e cultivos de outono-inverno, Dourados, MS, 2026.

Manejos de solo	Altura de plantas (cm)	Massa seca de hastes (kg ha ⁻¹)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Arado de aivecas	68,33 ab	4.921,8 a	3.201,6 a
Escarificador	66,42 b	5.070,0 a	3.060,2 a
Plantio direto	71,00 a	5.030,7 a	3.186,2 a
Arado de discos	67,58 ab	5.119,7 a	3.049,4 a

Cultivos de outono-inverno			
Milho	67,50 a	5.200,6 a	3.096,1 a
Milho + braquiária	70,08 a	4.810,1 a	2.921,1 a
Braquiária + crotalária	67,58 a	5.016,7 a	3.257,3 a
Mix	68,17 a	5.114,8 a	3.223,0 a
C.V. (%)	5,01	9,37	11,60
Média geral	68,33	5.035,59	3.124,41

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($P < 0,05$). (Mix) = Milho + Braquiária *ruziziensis* + *Crotalaria ochroleuca* + *Crotalaria spectabilis* + Feijão Mungo (*Vigna radiata* L.).

A interpretação da matriz de correlação (Tabela 12) priorizou o tamanho do efeito (r), conforme recomendado por Schober et al., (2018) utilizando a significância estatística apenas como suporte à interpretação biológica. De modo geral, os resultados evidenciam a forte interdependência entre os atributos microbiológicos do solo, reforçando o papel central da microbiota no funcionamento do sistema solo-planta, conforme destacado por (Volpiano et al., 2022).

A atividade da β -glicosidase apresentou correlações moderadas a fortes com indicadores do metabolismo microbiano, especialmente com a respiração ($C-CO_2$; $r = 0,72^*$) e com o quociente metabólico (qCO_2 ; $r = 0,65^*$), indicando que a atividade enzimática está intimamente associada à intensidade da atividade microbiana e à demanda por carbono no sistema. Esse comportamento reforça o papel da β -glicosidase como indicador sensível da ciclagem do carbono e da dinâmica microbiana no solo.

A correlação negativa observada entre qCO_2 e C-BMS ($r = -0,51^*$) sugere maior eficiência microbiana em sistemas com maior acúmulo de biomassa, uma vez que menores valores de qCO_2 indicam menor perda de carbono na forma de CO_2 por unidade de biomassa microbiana. Essa relação está de acordo com o conceito de eficiência do uso do carbono, em que sistemas mais estáveis tendem a apresentar maior incorporação de carbono na biomassa e menor dissipação energética, conforme relatado por (CHEN et al., 2024).

Adicionalmente, a forte correlação positiva entre C-BMS e $qMic$ ($r = 0,97^*$) evidencia a estreita relação entre o carbono microbiano e sua proporção em relação ao carbono orgânico total, indicando que o $qMic$ pode ser considerado um bom indicador da dinâmica da biomassa microbiana no solo.

Tabela 12 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre indicadores microbiológicos do solo.

	β - glicosidase	Arilsulfatase	Fosfatase ácida	C-BMS	C-CO ₂	qCO ₂	qMic
β -glicosidase	1						
Arilsulfatase	-0,15 ns	1					
Fosfatase	0,31 *	0,41 *	1				
C-BMS	0,10 ns	-0,02 ns	- 0,17	1			
C-CO ₂	0,72 *	0,00 ns	0,22 **	0,37 *	1		
qCO ₂	0,65 *	-0,03 ns	0,40 *	-0,51 *	0,50 *	1	
qMic	0,08 ns	-0,04 ns	-0,24 **	0,97 *	0,33 *	-0,51 *	1

Os valores apresentados na matriz correspondem aos coeficientes de correlação de Pearson (r). A significância foi por meio de asteriscos, conforme os níveis de probabilidade: ns = não significativo ($P \geq 0,10$); * = significativo a 5% de probabilidade ($P < 0,05$); ** = significativo a 10% de probabilidade ($P < 0,10$). s; (C-BMS) = carbono da biomassa microbiana; (C-CO₂) = respiração microbiana; (qCO₂) = quociente metabólico; (qMic) = quociente microbiano.

4. CONCLUSÕES

O revolvimento do solo na implantação do SPD contribuiu para a redistribuição do fósforo no perfil, favorece a atividade da fosfatase ácida e a massa de 100 grãos da soja. O manejo com escarificador promove maior atividade da β -glicosidase e maior nodulação da soja, enquanto no plantio direto há maior atividade da arilsulfatase.

Os cultivos de outono-inverno exerceram influência pontual sobre os teores de fósforo na camada superficial do solo, com destaque para o consórcio braquiária + crotalária. Para os demais atributos químicos e microbiológicos, bem como para a produtividade da soja, os sistemas avaliados apresentaram comportamento semelhante, sem diferenças expressivas entre os manejos.

A utilização de manejos com revolvimento do solo, para incorporação de calcário e gesso na implantação do sistema plantio direto, promove a redistribuição de nutrientes no perfil do solo, sem comprometer, a médio prazo, os atributos microbiológicos do solo e o desempenho produtivo da soja.

5. REFERÊNCIAS

ABEBE, T. G.; TAMTAM, M. R.; ABEBE, A. A.; ABTEMARIAM, K. A.; SHIGUT, T. G.; DEJEN, Y. A.; HAILE, E. G. (2022). Growing Use and Impacts of Chemical Fertilizers and Assessing Alternative Organic Fertilizer Sources in Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, v. 2022, p. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4738416>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2022/4738416>. Acesso em: 11 mai. 2025.

ALMEIDA, D. S.; DELAI, L. B.; SAWAYA, A. C. H. F.; ROSOLEM, C. A. Exudation of organic acid anions by tropical grasses in response to low phosphorus availability. **Scientific Reports**, v. 10, p. 16955, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-73398-1. Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7552410/>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, 2011.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 22 (2) p. 251-255, 1990.

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*, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 393-395, 1993.

ANDRADE, M. G. O.; CORDEIRO, C. F. S.; ROBERTO, A. F.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Lime and gypsum reduce N-fertilizer requirements and improve soil physics, fertility and crop yields in a double-cropped system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 450, p. 117132, 2024. DOI: 10.1016/j.geoderma.2024.117132. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706124003616?via%3Dihub>. Acesso em: 12 dez. 2025.

ANGELETTI, M. P.; SOUSA, J. L. de; COSTA, H.; DE PAULA, E.; MUNIZ, E. S.; LAURETT, L.; GONÇALVES, H. C. G. Plantas para cobertura de solo e manejo da biodiversidade em agroecossistemas da agricultura familiar no Espírito Santo. *Cadernos de Agroecologia, Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF*, v. 13, n. 1: 7 p. 2018 a. Disponível em: <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/123456789/3261/1/1262-Texto-do-resumo-3418-1-10-20180822.pdf> >. Acesso em: mai., 2025.

ARAGÃO, O. O. S.; LONGATTI S. M. O.; CAPUTO, P. S. C.; CARVALHO, M. R.; RODRIGUES, G.; CARVALHO, T. S.; MOREIRA, F. M. S. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, January, p. 106205, 2020.

ARAÚJO, F. C.; SCHREINER, R. P.; ROSO, R.; HELDWEIN, A. B.; NUNES, J. B.; GALLI, F. M.; ZABOTT, J. C. Cultivo de plantas de cobertura na produção de biomassa de plantas daninhas. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO**, 11., 2019, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú: SOSBAI, 2019. Resumo expandido.

ASHRAF, M. N.; WAQAS, M. A.; RAHMAN, S. Microbial metabolic quotient (qCO_2): trends, implications and perspectives. **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 12, p. 1794–1803, 2022. DOI: 10.1134/S1064229322700119.

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; ACOSTA-MERCADO, D.; SOTOMAYOR-RAMÍREZ, D.; CRUZ-RODRÍGUEZ, L. Microbial communities and enzymatic activities under different management in semiarid soils. **Applied Soil Ecology**, v. 38, n. 3, p. 249–260, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.10.012>. Disponível em: Acessar artigo no ScienceDirect. Acesso em: 5 mar. 2026.

BALOTA, E. L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 35, p. 300-306, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjm/a/Jt4h9dt8ZfKcvQ3tTnsWk9j/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 10 jan. 2026.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. 8, 2013.

BALOTA, E.L.; CHAVES, J.C.D. Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1573-1583, 2010.

BANNING, N. C.; GRANT, C. D.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V. Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n.8, p. 2021-2031, 2008.

BARBIERI, M.; DOSSIN M. F.; NORA, D. D.; SANTOS, W. B. D.; BEVILACQUA, C.; ANDRADE, N. D.; ANTONIOLLI, Z. I. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, 42:121-130, 2019.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 15. ed. New York: Pearson Education, 2017.

BURNS, R. G. et al., Soil enzymes in a changing environment. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216–234, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071712004476?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jan. 2026.

CARVALHO, A. M. de; OLIVEIRA, A. D. de; COSER, T. R.; MARTINS, A. D.; MARCHÃO, R. L.; PULROLNIK, K.; SÁ, M. A. C. de. **Plantas de cobertura do solo recomendadas para a entressafra de milho em Sistema Plantio Direto no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018. (Comunicado Técnico, 181). ISSN 1517-1469. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339235596>. Acesso em: 21 maio 2025.

CAVALARIS, C.; GEMTOS, T.; KARAMOUTIS, C. Práticas de rotação de culturas para lidar com a compactação do solo na agricultura de carbono. **Soil Systems**. 2023, 7, 90. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040090>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8789/7/4/90>. Acesso em: 12 jul. 2025.

CECCON, G.; SILVA, J. F.; MAKINO, P. A.; NETO NETO, A. L. Consórcio milho-braquiária com densidades populacionais da forrageira no Centro-Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.17, n.1, p. 157-167, 2018.

CHEN, Q.; SONG, Y.; AN, Y.; LU, Y.; ZHONG, G. Soil microorganisms: their role in enhancing crop nutrition and health. **Diversity**, Basel, v. 16, n. 12, p. 734, 2024. DOI: 10.3390/d16120734. Disponível em: <https://www.mdpi.com/3065868>. Acesso em: 10 mar. 2025.

COÊLHO, R. S. **Qualidade do solo em sistemas de produção agropecuária, sob Latossolos Vermelhos no Mato Grosso do Sul**. 2020. 79 f. Dissertação (mestrado) – Agronomia – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Aquidauana, 2020.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25 – oitavo levantamento**. Brasília, DF: Conab, v. 12, n. 8, maio 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 25 maio 2025.

CONGREVES, K. A. A.; HAYES, E. A.; VERHALLEN, L. L.; VAN E. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems, **Soil and Tillage Research**, v 152, p. 17-28 2015. DOI:10.1016/j.still.2015.03.012.

DA SILVA, J. G. Preparo do Solo. **Portal Embrapa**. 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-ecnologica/cultivos/feijao/producao/preparo-do-solo>>. Acesso em: 19 set. 2023.

DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; MATOS, A. T. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 35, n. 3, p. 506-513, 2015.

DE RESENDE, A. V.; GIEHL, J.; GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; COELHO, A. M.; DOS SANTOS, F. C.; ABREU, S. C. **Manejo da fertilidade do solo e adubação do milho na Região Centro Oeste**. Repositório Institucional da EMBRAPA (Repository Open Access to Scientific Information from EMBRAPA - Alice). 2020. Disponível em:<<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1126371>>. Acesso em: 11 mar. 2025.

DEMATTÊ, J. L. I. e DEMATTÊ, J. A. M. Manejo e sustentabilidade agrícola de solos do Brasil: fundamentos **[Manejo dos solos]**. Piracicaba, SP: LSO-ESALQ, 2024. p. 651 : il. Disponível em: <https://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/view/1398/1271/4917>. Acesso em: 09 mar. 2025.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 107–124.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; FILHO, J. C. A.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.15, n.9, p.1003-102, 2016.

FERNANDES, C. H. S.; TEJO, D. P.; ARRUDA, K. M. A. Desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto no Brasil: Histórico, Implantação e Culturas Utilizadas. **UNICIÊNCIAS**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 83–88, 2019. DOI: 10.17921/1415-5141.2019v23n2p83-88. Disponível em: <https://uniciencias.pgsscogna.com.br/uniciencias/article/view/6466>. Acesso em: 11 mar. 2025.

FERNANDES, V. C.; LAZARINI, E.; SANCHES, I. R.; SANTOS, F. L.; BOSSOLANI, J. W. Calagem, gessagem, culturas de cobertura e adubação nitrogenada em sistema plantio direto: estado nutricional e produtividade do milho. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. 56-69, 2020.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

FLOSS, E. L. Maximizando o rendimento da soja “Ecofisiologia, nutrição e manejo”. 2 ed, Passo Fundo: Aldeia Sul, 2022. 416p.

FRANCHINI, J. C.; CRISPINO, C. C.; SOUZA, R. A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.92, p.18-29, 2007.

FREITAS, L. A.; MELLO, L. M. M.; YANO, É. H.; PEREIRA, D. S.; SOUZA, F. H. de. Efeito dos sistemas conservacionistas do solo e residual do gesso sobre a cultura da soja. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 6, p. 375-379, nov./dez. 2016. DOI: 10.14583/2318-7670.v04n06a05. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311910471>. Acesso em: 28 jun. 2025.

GASPAR, A. P.; LABOSKI, C. A. M.; NAEVE, S. L.; CONLEY, S. P. Dry matter and nitrogen uptake, partitioning, and removal across a wide range of soybean seed yield levels. **Crop Science**, v. 57, n. 4, p. 2170–2182, 2017. DOI: 10.2135/cropsci2016.05.0322. Disponível em: <https://experts.umn.edu/en/publications/dry-matter-and-nitrogen-uptake-partitioning-and-removal-across-a-/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, v. 368, n. 1-2, p. 5-21, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1567-y.

HAYNES, R. Tamanho e atividade da biomassa microbiana do solo sob manejo de gramíneas e culturas aráveis. **Biol Fertil Soils**. 210–216 (1999). DOI: 10.1007/s003740050610. Acesso em: 11 jun. 2025.

ISLAM, M. M.; ISHIBASHI, Y.; NAKAGAWA, A. C. S.; TOMITA, Y.; IWAYA-INOUE, M.; ARIMA, S.; ZHENG, S. H. Nitrogen redistribution and its relationship with the expression of GmATG8c during seed filling in soybean. **Journal of Plant Physiology**, v. 192, p. 71–74,

2016. DOI: 10.1016/j.jplph.2016.01.007. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26871505/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

ILKA, E.; GERIGK, J.; LINSLER, D.; JOERGENSEN, R. G.; POTTHOFF, M. Tillage and land use management effects on soil organic matter and soil microbial biomass in a field network of practical farms in France, Romania, and Sweden. **Applied Soil Ecology**, v 202, 2024. DOI:10.1016/j.apsoil.2024.105584. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139324003159>.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 8 (3), p. 209-213, 1976.

KOCHHANN, R. A. e DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: EmbrapaCNPT, 2000. 36p. (Documentos, 20). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/84084/1/CNPTDOCUMENTOS-20-IMPLANTACAO-EMANEJO-DO-SISTEMA-PLANTIODIRETO-FL-13398.pdf> Acesso em: 14 mai. 2024.

LIMA, L. B. DE; PETTER, F. A.; LEANDRO, W. M. Desempenho de plantas de cobertura sob níveis de compactação em Latossolo Vermelho de Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, p. 1064-1071, 2015.

LISBOA, B. B., VARGAS, L. K., SILVEIRA, A. O., MARTINS, A. F., SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 33–44, jan. 2012.

LORENZETTI, J. G.; RODRIGUES, M. A.; SOARES, A. P.; VIEIRA, C. R. Densidade de plantas e os efeitos nas características agrônômicas, temperatura e umidade do solo em consórcio milho-braquiária. *Nativa*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 101–107, 2024. DOI: 10.31413/nativa.v11i1.14024. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/14024>. Acesso em: 4 maio. 2025.

LORI M.; SYMNACZIK S.; MÄDER P.; DE DEYN G.; GATTINGER A. A agricultura orgânica aumenta a abundância e a atividade microbiana do solo — Uma meta-análise e meta-regressão. **Soil Biology & Biochemistry**. v 12 p25, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180442>

MAHARJAN, M.; SANAULLAH, M.; RAZAVI, B.; KUZUYAKOV, Y. Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. *Applied Soil Ecology*, Amsterdam, v. 113, p. 22-28, 2017.

MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; SOUSA, D. M. G. de (in memoriam); DANTAS, O. D.; OLIVEIRA, M. I. L. de; MALAQUIAS, J. V. **Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 50 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, 369). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1133109>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MICHELON, C. J.; JUNGES, E.; CASALI, C. A.; PELLEGRINI, J. B. R.; ROSA NETO, L.; OLIVEIRA, Z. B.; OLIVEIRA, M. B. Soil attributes and yield of corn cultivated in succession to winter cover crops. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 18, n. 2, p. 230–239, 2019. DOI: 10.5965/223811711812019230. Disponível em: <https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/9872>. Acesso em: 11 mar. 2025.

MICHALOVICZ, L.; MARQUES, L. M. M.; SIMONETI, F. J. S.; KAWAKAMI, J.; DO NASCIMENTO, R.; MACHADO, K. L. F. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 38, núm. 5, 2014, pp. 1496-1505.

MONTEIRO, M. A. C.; ZOZ, A.; LIMEDE, A. C.; OLIVEIRA, C. E. S.; ZOZ, T. Efeito do preparo do solo com diferentes implementos sobre a resistência do solo à penetração. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 2, p. 63-68, abr./jun. 2017.

MÜHLBACHOVÁ, G.; RŮŽEK, P.; KUSÁ, H.; VÁVERA, R.; KÁŠ, M. Distribuição de nutrientes no perfil do solo sob diferentes práticas de cultivo durante um ensaio de campo de longo prazo. **Agronomia**, 14, 2017, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14123017>

NANNIPIERI, P. et al., Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, v. 63, p. 723–740, 2012. Disponível em: <https://discovery.researcher.life/article/microbial-diversity-and-soil-functions/e978e1098a7e3813a38b61edc62a3db0>. Acesso em: 19 jan. 2026.

NANNIPIERI, P. et al., Role of enzymes in soil nutrient cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 141, 107698, 2020.

NANNIPIERI, P. et al., Soil enzymology: classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils*, v. 54, p. 1–17, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-017-1246-5>. Acesso em: 19 jan. 2026.

NEVES, R. C.; VILAR, C. C.; USHIWATA, S. Y.; COSTA, A. C.; HARTWIG, C. F. V.; CHAVES, J. S. Persistência de palhada de *Urochloa ruziziensis* em sistema de plantio direto e convencional no município de Nova Xavantina-MT. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 11, n. 3, p. 110–122, set./dez. 2018.

NOVAK, E.; CARVALHO, Alves, L.; SANTIAGO, E. F.; TOMAZI, M.; GOMES, A. C. C. O.; PIANA, P. A. Biomassa e atividade microbiana do solo sob diferentes coberturas vegetais em Região Cerrado - Mata Atlântica. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 1–16, 2022. DOI: 10.17765/2176-9168.2022v15n3e8780. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/8780>. Acesso em: 6 jun. 2025.

PACHECO, L. P.; MIGUEL, A. S. D. C. S.; SILVA, R. G.; SOUZA, E. D.; PETTER, F.A.; KAPPES, C. Biomass yield in production systems of soybean sown in succession to annual crops and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.52, n.8, p. 582 – 591, 2017.

PASSOS, A. M. A. dos; ALVARENGA, R. C.; SANTOS, F. C. dos. **Sistema de plantio direto**. In: NOBRE, M. M.; OLIVEIRA, I. R. de (Ed.). Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação. Brasília, DF: Embrapa, 2018. cap. 3, p. 61-104.

PASSOS, S. R.; REIS JUNIOR, F. B.; RUMJANEK, N. G.; MENDES, I. C.; BAPTISTA, M. J.; XAVIER, G. R. Atividade enzimática e perfil da comunidade bacteriana em solo submetido à solarização e biofumigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 7, p. 879–885, jul. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/Zg5KQcH5nBjN9S98FPRCyWG>. Acesso em: 21 maio 2025.

PIAS, O. H. C.; BAYER, C. **Manejo da acidez do solo e adubação sulfatada no sistema plantio direto**. 2020. 144 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2020.

PITON, G.; FOULQUIER, A.; LAURA B. MARTÍNEZ G.; LEGAY, N.; HEDLUND, K.; DA SILVA, P. M.; NASCIMENTO, E.; REIS, F.; SOUSA, J. P.; DEYN, G. B.; CLEMENT, J. C. Disentangling drivers of soil microbial potential enzyme activity across rain regimes: An approach based on the functional trait framework. **Soil Biology and Biochemistry**, v 148, 2020. DOI:10.1016/j.soilbio.2020.107881.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G. C.; SANTOS, E. J. S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 713–721, 1998.

RIBEIRO, L. M.; CECCON, G.; MECI, I. A.; SANTOS, A. L. F.; MAKINO, P. A.; FACHINELLI, R. Produtividade da soja em sucessão a cultivos. **Agrarian**, [S. l.], v. 11, n. 40, p. 120–131, 2018. DOI: 10.30612/agrarian. v11i40.5379. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/agrarian/article/view/5379>. Acesso em: 1 maio. 2025.

ROSOLEM, C. A.; SGARIBOLDI, T.; GARCIA, R. A.; CALONEGO, J. C. Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. 16, p. 1934–1943, 2010. DOI: 10.1080/00103624.2010.495804.

ROPER, M. M.; DAVIES, S. L.; BLACKWELL, P. S.; HALL, D. J. M.; BAKKER, D. M.; JONGEPIER, R.; WARD, P. R. Opções de manejo para solos hidrofóbicos na agricultura de sequeiro australiana. **Soil Research**, 53, 786–806 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14330>. Disponível em: <https://connectsci.au/sr/article/53/7/786/46703/Management-options-for-water-repellent-soils-in>. Acesso em: 5 fev. 2026.

SAKIB T. U.; NELSON N. O.; HETTIARACHCHI G. M.; MOORBERG C. J.; NIPPERT J. B.; WHITAKER S. Soil phosphorus availability as affected by root exudates of cover crop species. **Scientific Reports**. Sep. 29 13 p. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-19102-7. Disponível em: < <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12480450/> >. Acesso em 27 dez. 2025.

SANTANA, C. A. M.; CAMPOS, S. K.; MARRA, R.; ARAGÃO, A. A. **Cerrado: pilar da agricultura brasileira**. In: BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. (Ed.). Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 1, cap. 2, p. 39-58.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1176834>. Acesso em: 10 dez. 2025.

SANTOS, D. R.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; SANTANNA, M. A.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 222–231, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198718302368?via%3Dihub>. Acesso em: 05 mar. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. SAEG – Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas. Versão 9.1. Viçosa, MG: UFV, 2007.

SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. Uma revisão sobre o efeito da compactação do solo e seu manejo para a produção agrícola sustentável. *J. Biosyst. Eng.* 46, 417–439 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>. Acesso em: 7 mar. 2025.

SCHOBBER P, BOSSERS SM, SCHWARTE LA. Statistical Significance Versus Clinical Importance of Observed Effect Sizes: What Do P Values and Confidence Intervals Really Represent? *Anesth Analg.* 2018 Mar;126(3):1068-1072. doi: 10.1213/ANE.0000000000002798. PMID: 29337724; PMCID: PMC5811238.

SICZEK, A. E LIPIEC, J. Nodulação e fixação de nitrogênio em soja em resposta à compactação do solo e à cobertura morta com palha. **Soil & Tillage Research**, 114, 50-56, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.001>. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2226042&utm>. Acesso em: 20 jan. 2026.

SILVA PEREIRA, J. L.; ROSA, J. D.; MEDEIROS, J. C.; JESUS LACERDA, J. J. D.; DE SOUSA, M. D. N. G.; RODRIGUES, P. C. F.; OLIVEIRA FILHO, E. G.; DE SOUSA, D. C. Erosão hídrica em sistemas de preparo do solo sob chuva simulada no Cerrado Piauiense. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, [S. l.], v. 1, pág. 2342–2356, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n1-160. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/22808>. Acesso em: 3 fev. 2025.

SILVA, F. C. (ed.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p. ISBN 978-85-7383-430-7. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>>. Acesso em: 28 jul. 2025.

SILVA, H. S.; CHAVES, J. S.; NASCIMENTO, J. P. S.; MATOS, S. M.; NETO, A. F. B.; LEITE, J. L.; PEREIRA, H. R.; BRITO, W. A. Soil microbial activity in a consortium

production system. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 14, p. e534101422366, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i14.22366. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/22366>. Acesso em: 6 jun. 2025.

SILVA, J. M.; ALBURQUERQUE, L. S. D.; SANTOS, T. M. C. D.; OLIVEIRA, J. U. L. D.; GUEDES, E. L. F. Mineralização de vermicompostos estimada pela respiração microbiana. *Revista Verde*, Pombal, PB, v. 8, n. 4, p. 132-135, 2013.

SILVA, M. A.; STEPHAN, N. A.; LANNA, A. C.; REZENDE, C. C.; CRUZ, R. D. C.; FRASCA, L. L. M.; FERREIRA, A. L.; FERREIRA, I. V. L.; DUARTE, J. R. M.; FILIPPI, M. C. C. Sistema de cultivo direto e rotação de culturas no Cerrado. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 13, pág. 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i13.35568. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/35568>. Acesso em: 7 fev. 2025.

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010.

SILVA, Y. K. D. L.; PARAGUASSU, M. E.; OLIVEIRA, T. F.; MELO, M. C.; FILHO, A. C.; GOD GOOD, P. I. Sistemas de preparación del suelo y sus efectos en el desarrollo del cultivo de la soja. **Investigación agraria**, San Lorenzo, PY, v. 23, n. 2, p. 94–100, 2021. DOI: 10.18004/investig.agrar.2021.diciembre.2302672. Disponível em: <https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/672>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SILVA-ABUD, L. L.; FERRARI, G. S.; LIMA, V. M. M.; STIVAL, M. M. Coinoculação de *Azospirillum brasilense* e *Bradyrhizobium japonicum* no desenvolvimento da soja. **Scientific Electronic Archives**, [S. l.], v. 14, n. 7, p. 25–32, 2021. DOI: 10.36560/14720211328. Disponível em: <https://scientelectronicarchives.org/index.php/SEA/article/view/1328>. Acesso em: 3 maio. 2025.

SINSABAUGH, R. L. et al., Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*, v. 11, p. 1252–1264, 2008. Disponível em: https://www.nrel.colostate.edu/assets/nrel_files/projects/ssi/docs/microbiology_articles/Sinsabaugh%20et%20al_2008.pdf?. Acesso em: 10 dez. 2025.

SITHOLE, N. J.; MAFONGOYA, P. L. Conventional tillage and its role in seedbed preparation and soil disturbance. **Soil and Tillage Research**, v. 163, p. 108–120, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198714001822>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SOUZA, H. A.; LIMA NETO, A. J.; POMPEU, R. C. F. F.; GUEDES, F. L.; TONUCCI, R. G.; CAVALCANTE, A. C. R.; NATALE, W.; VALLADARES, G. S.; ESCOBAR, M. E. O.; RODRIGUES, H. C. A.; ANDRADE, H. A. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SAGRILO, E. Critical levels and fertility classes of soils with high-activity clay in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 48, e0230154, 2024. DOI: 10.36783/18069657rbcs20230154.

SOUZA, J. L. B.; ANTONANGELO, J. A.; ZHANG, H.; REED, V.; FINCH, B.; ARNALL, B. Impact of long-term fertilization in no-till on the stratification of soil acidity and related

parameters. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 228, 2023, p. 105624. DOI: 10.1016/j.still.2022.105624. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198722003105>. Acesso em: 30 jan. 2026.

SOUZA, N. R.; CASTRO, L. A. A.; SOUSA, D. M. G.; CARVALHO, M. I. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1407–1419, 2011.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: R. W. Weaver et al., (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, 1994. TANG, Lin. Soil Fertility, Plant Nutrition and Nutrient Management. **Plants, Basel**, v. 14, n. 1, article 34, 2025. DOI: 10.3390/plants14010034. Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11723126/>>. Acesso em: 10 jun. 2025.

TABATABAI, M. A. e BREMNER, J. M. Uso de p-nitrofenol fosfato para o ensaio da atividade da fosfatase do solo. **Soil Biology Biochemistry**, 1, 301-307. 1969. DOI: 10.1016/0038-0717(69)90012-1. Disponível em: <https://www.scirop.org/reference/referencespapers?referenceid=1030250>. Acesso em: 10 jun. 2025

TABATABAI, M. A. e BREMNER, J. M. Atividade da arilsulfatase em solos. **Soil Science Society of America Journal**, 34: 225-229, 1970. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400020016>. Acesso em: 10 out. 2025.

EIVAZI, F. e TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1). Acesso em: 07 abr. 2026.

TIECHER, T.; FONTOURA, S. M. V.; AMBROSINI, V. G.; ARAÚJO, E. A.; ALVES, L. A.; BAYER, C.; GATIBONI, L. C. Soil phosphorus forms and fertilizer use efficiency are affected by tillage and soil acidity management. **Geoderma**, v. 435, 116495, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123001726>. Acesso em: 9 mar. 2026.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J., & COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211–219, mar. 2007.

TORRES, J. L. R.; SILVA, M. G. S.; CUNHA, M. A.; VALLE, D. X. P.; PEREIRA, M. G. Produção de fitomassa e decomposição de resíduos culturais de plantas de coberturas no cultivo da soja em sucessão. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 3, p. 247–253, jul./set. 2014.

TSHUMA, F.; RAYNS, F.; LABUSCHAGNE, J.; BENNETT, J.; SWANEPOEL, P. A. Effects of long-term (42 years) tillage sequence on soil chemical characteristics in a dryland farming system. **Soil and Tillage Research**, v. 212, art. 105064, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2021.105064.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. As extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, 19(6), p 703-707, 1987.

VELOSO, F. R.; SILVA, L. F. V.; JACINTO, A. C. P.; JORGE, R. F.; ALMEIDA, C. X.; CARVALHO, E. R. Crop systems and cover crops for soybean production in the Cerrado. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 11, p. e152111133439, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33439. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/33439>. Acesso em: 19 mai. 2025.

VINHAL-FREITAS, I. C.; CORREA, G. F.; WENDLING, B.; BOBULSKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecological Indicators**,[s.l.], v. 74, p. 182-190, 2017.

VOLPIANO, C. G.; LISBOA, B. B.; JOSÉ, J. F. B. de S.; BENEDUZI, A.; GRANADA, C. E.; VARGAS, L. K. Soil-plant-microbiota interactions to enhance plant growth. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, 2022. DOI: 10.36783/18069657rbcs20210098. Disponível em: <https://www.rbcsjournal.org/article/soil-plant-microbiota-interactions-to-enhance-plant-growth/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

WENYIKA, P.; ENESI, R. O.; GORIM, L. Y.; DYCK, M. Efeitos da calagem nas propriedades físicas e químicas do solo na Europa e na América do Norte: uma revisão. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 8, e70175, 2025. DOI: 10.1002/agg2.70175.

WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; DOS SANTOS, K. F.; MUZEKA, L. M. Plantas de cobertura do solo e seus efeitos nas propriedades físicas e produtividade de soja e milho. **Scientia Agraria Paranaensis**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 272–281, 2018. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/19245>. Acesso em: 19 maio. 2025.

YAN, C.; YANG, Y.; SONG, J.; SHAN, F.; LYU, X.; YAN, S.; WANG, C.; SONG, Q.; MA, C. Analysis of the beneficial effects of prior soybean cultivation to the field on corn yield and soil nitrogen content. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 1413507, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1413507>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11319277/>. Acesso em: 04 mar. 2026.

APÊNDICE A. Resumo da análise de variância para o N total; P₂O₅; K⁺; Ca²⁺; Mg²⁺; MO; Ctotal%; pH CaCl₂; CTC; SB; Cu; Fe; Mn; Zn; V% e H+Al³, avaliados antes da semeadura da soja 2024/25, nas camadas de 0–10; 10–20; 20–30 e 30–40 em manejos de solo e sistemas de cultivo. Dourados, MS 2026.

Quadrado Médio																	
Fontes de Variação	GL	N total								P ₂ O ₅							
		----- cmol _c dm ⁻³ -----								----- mg dm ⁻³ -----							
		Camadas do solo (cm)															
		0–10		10–20		20–30		30–40		0–10		10–20		20–30		30–40	
Solo	3	0,0007	ns	0,0003	ns	0,0001	ns	0,0001	ns	400,6487	ns	201,9684	*	10,6282	ns	6,4498	ns
Cultura	3	0,0006	ns	0,0003	ns	0,0001	ns	0,0000	ns	645,9058	*	111,5121	ns	24,5039	ns	2,9373	ns
Solo*Cultura	9	0,0014	ns	0,0000	ns	0,0001	ns	0,0000	ns	178,2941	ns	15,3289	ns	8,9215	ns	3,1838	ns
Erro	30	0,0072		0,0001		0,0001		0,0001		179,4024		68,2893		16,6500		3,9548	
C.V. (%)	-	8,7600		9,4400		7,5400		8,3200		33,8300		39,9500		39,7800		41,6900	
Média	-	0,1700		0,1200		0,1000		0,0900		39,5800		20,6800		10,2500		4,7700	

Quadrado Médio																			
Fontes de Variação	GL	K ⁺														Ca ²⁺			
		----- cmol _c dm ⁻³ -----																	
		Camadas do solo (cm)																	
		0–10		10–20		20–30		30–40		0–10		10–20		20–30		30–40			
Solo	3	0,1301	*	0,0012	ns	0,0057	ns	0,0043	ns	1,0948	ns	1,4607	ns	0,8017	ns	0,9604	*		
Cultura	3	0,0195	ns	0,0428	ns	0,0104	ns	0,0002	ns	0,0503	ns	0,0465	ns	0,3113	ns	0,1105	ns		
Solo*Cultura	9	0,0424	ns	0,0097	ns	0,0112	ns	0,0025	ns	0,4464	ns	0,6386	ns	0,4424	ns	0,0876	ns		
Erro	30	0,0244		0,0271		0,0176		0,0032		0,4697		0,7390		0,4889		0,2254			

		Quadrado Médio															
Fontes de Variação	GL	Ctotal %						pH CaCl ₂									
		Camadas do solo (cm)															
		0–10		10–20		20–30		30–40		0–10		10–20		20–30		30–40	
Solo	3	0,0224	ns	0,0494	ns	0,0329	*	0,0175	ns	0,1304	ns	0,4827	*	0,1382	ns	0,1549	ns
Cultura	3	0,0159	ns	0,0137	ns	0,0040	ns	0,0067	ns	0,0340	ns	0,0057	ns	0,0832	ns	0,1191	ns
Solo*Cultura	9	0,0197	ns	0,0041	ns	0,0101	ns	0,0041	ns	0,0916	ns	0,1263	ns	0,0872	ns	0,0448	ns
Erro	30	0,0266		0,0214		0,0106		0,0123		0,0701		0,1477		0,1099		0,0638	
C.V. (%)	-	8,3200		10,7000		8,5900		10,9500		4,2800		6,6700		6,1800		4,8400	
Média	-	1,1500		1,3600		1,1900		1,0100		6,1900		5,7600		5,3600		5,2200	

		Camadas do solo (cm)																	
		0–10		10–20		20–30		30–40		0–10		10–20		20–30		30–40			
Solo	3	0,5935	ns	0,1802	ns	0,2560	ns	0,4800	ns	1,6464	ns	2,8074	ns	1,0192	ns	1,1277	ns		
Cultura	3	0,3012	ns	0,6222	ns	0,3413	ns	0,5001	ns	0,1867	ns	0,1185	ns	0,4876	ns	0,2226	ns		
Solo*Cultura	9	0,2800	ns	0,2695	ns	0,4093	ns	0,4259	ns	1,1276	ns	1,1893	ns	0,7323	ns	0,1351	ns		
Erro	30	0,2149		0,2853		0,3538		0,4541		0,6495		1,2903		0,8829		0,4488			
C.V. (%)	-	4,5100		5,1300		6,3100		8,1800		10,0800		15,8500		17,1000		15,2500			
Média	-	10,2700		10,4000		9,4200		8,2300		7,9900		7,1600		5,4900		4,3900			
Quadrado Médio																			
		Cu																Fe	
Fontes de Variação	GL	----- mg dm ⁻³ -----																	
		Camadas do solo (cm)																	
		0–10		10–20		20–30		30–40		0–10		10–20		20–30		30–40			
Solo	3	0,8657	ns	0,6425	ns	1,1602	ns	1,1374	ns	164,1038	ns	29,9482	ns	24,3453	ns	35,3093	ns		
Cultura	3	2,6413	ns	1,4810	*	0,3792	ns	0,3434	ns	41,5065	ns	3,3431	ns	3,9827	ns	11,3988	ns		
Solo*Cultura	9	2,6479	ns	0,1622	ns	0,2031	ns	0,3210	ns	216,1056	ns	12,6186	ns	2,9198	ns	12,8127	ns		
Erro	30	1,8235		0,3571		0,5149		1,1627		122,1374		14,4377		9,8754		15,8358			
C.V. (%)	-	11,5500		5,0000		6,0600		9,9300		37,1700		12,4600		9,2000		11,0900			
Média	-	11,6900		11,7700		11,8400		10,8600		29,7300		30,5000		34,1500		35,8800			
Quadrado Médio																			
		Mn																Zn	
Fontes de Variação	GL	----- mg dm ⁻³ -----																	
		Camadas do solo (cm)																	
		0–10		10–20		20–30		30–40		0–10		10–20		20–30		30–40			
Solo	3	1165,5368	*	708,0111	*	71,7900	ns	297,6892	ns	13,7656	ns	0,9306	ns	0,4613	ns	0,6197	ns		
Cultura	3	103,4515	ns	539,5013	ns	167,1414	ns	91,7444	ns	7,3166	ns	0,4493	ns	0,2264	ns	0,2013	ns		

Solo*Cultura	9	239,2218	ns	306,1915	ns	174,7119	ns	103,3909	ns	6,5408	ns	0,3815	ns	0,3304	ns	0,2624	ns
Erro	30	253,1217		243,5611		270,3110		177,6534		6,6372		0,3905		0,5535		0,2916	
C.V. (%)	-	13,8800		14,2100		19,1800		22,3300		59,8400		28,7700		57,4500		68,0700	
Média	-	114,5900		107,7700		85,6700		59,6900		4,3000		2,1700		1,2900		0,7900	
Quadrado Médio																	
Fontes de Variação	GL	V%								H+Al ³⁺							
		Camadas do solo (cm)															
		0-10		10-20		20-30		30-40		0-10		10-20		20-30		30-40	
Solo	3	96,8264	ns	317,6812	*	119,5984	ns	144,8544	ns	0,9255	ns	3,5922	*	1,1758	ns	1,1923	ns
Cultura	3	35,3365	ns	9,1770	ns	78,8306	ns	84,6168	ns	0,4433	ns	0,2914	ns	1,0572	ns	1,2123	ns
Solo*Cultura	9	71,2747	ns	90,4150	ns	59,7903	ns	27,2757	ns	0,7640	ns	0,9575	ns	0,4807	ns	0,4191	ns
Erro	30	47,9375		107,5821		88,7787		53,2962		0,5062		1,1629		0,8262		0,5257	
C.V. (%)	-	8,9000		15,0600		16,1500		13,6500		31,2500		33,2800		23,1500		18,8500	
Média	-	77,8100		68,8800		58,3200		53,4600		2,2700		3,2400		3,9200		3,8400	