

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
UNESP CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INTERAÇÕES DE COMPOSTO À BASE DE ESTERCO
BOVINO NO SISTEMA SOLO-MICROBIOTA-PLANTA EM
CULTIVO DE SOJA**

Rosa Betânia Rodrigues de Castro
Bióloga

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
UNESP CÂMPUS DE JABOTICABAL

**INTERAÇÕES DE COMPOSTO À BASE DE ESTERCO BOVINO NO
SISTEMA SOLO-MICROBIOTA-PLANTA EM CULTIVO DE SOJA**

Rosa Betânia Rodrigues de Castro

Orientador: Prof. Dr. Everlon Cid Rigobelo

Coorientadora: Prof. Dra. Osania Emerenciano Ferreira

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Microbiologia Agropecuária.

2025

C355i

Castro, Rosa Betânia Rodrigues de

Interações de composto à base de esterco bovino no sistema solo-microbiota-plantas em cultivo de soja / Rosa Betânia Rodrigues de Castro. -- Jaboticabal, 2025

86 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Everlon Cid Rigobelo

Coorientadora: Osania Emerenciano Ferreira

1. Agricultural microbiology. 2. Soybean. 3. Adubos compostos. 4. Soil productivity. 5. Microbial ecology. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INTERAÇÕES DE COMPOSTO À BASE DE ESTERCO BOVINO NO SISTEMA SOLO-MICROBIOTA-PLANTA EM CULTIVO DE SOJA

AUTORA: ROSA BETÂNIA RODRIGUES DE CASTRO

ORIENTADOR: EVERLON CID RIGOBELLO

COORIENTADORA: OSANIA EMERENCIANO FERREIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Microbiologia Agropecuária, pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

EVERLON CID RIGOBELLO

Data: 22/07/2025 07:33:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EVERLON CID RIGOBELLO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

TATIANE CARLA SILVA

Data: 23/07/2025 14:52:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pós-doutoranda TATIANE CARLA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Genética / FCFRP USP Ribeirão Preto/SP



Documento assinado digitalmente

GUSTAVO VITTI MÔRO

Data: 25/07/2025 10:45:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GUSTAVO VITTI MÔRO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

ALAN RODRIGUES TEIXEIRA MACHADO

Data: 27/07/2025 17:32:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ALAN RODRIGUES TEIXEIRA MACHADO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Exatas / Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) - João Monlevade/MG



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

ELEUSA MARIA FERREIRA ROCHA

Data: 28/07/2025 12:32:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pós-Doutoranda ELEUSA MARIA FERREIRA ROCHA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Agrárias e Naturais / Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) -
Ituiutaba/MG

Jaboticabal, 18 de julho de 2025

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Rosa Betânia Rodrigues de Castro – nascida em Ituiutaba (MG), em 28 de setembro de 1966, filha de Joana Alves Rodrigues e Leonias Alves Rodrigues. Graduada em Ciências Biológicas pelo Instituto Superior de Ensino e Pesquisa de Ituiutaba (ISEPI) no ano de 1989. Em 2003 concluiu o curso de Especialização Lato Sensu em Gestão e Auditoria Ambiental na Fundação Educacional de Ituiutaba (FEIT). Em 2013 iniciou o curso de Mestrado em Microbiologia Agropecuária na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) - Câmpus de Jaboticabal (SP), sob orientação do Prof. Dr Jackson Antônio Marcondes de Souza, concluindo-o em 2015. Em 2021 iniciou o curso de Doutorado na mesma instituição, orientada pelo Prof. Dr. Everlon Cid Rigobelo e coorientada pela Prof. Dra. Osania Emerenciano Ferreira, concluindo-o em 2025. Atualmente, é professora da educação básica da rede municipal de Ituiutaba-MG e também professora de educação superior da Universidade do Estado de Minas Gerais-UEMG.

"Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele o fará."
— Salmo 37:5

DEDICATÓRIA

À memória amorosa da minha mãe, Joana, e do meu pai, Leonias (Lió), cujos ensinamentos, exemplos de vida e amor incondicional continuam a me guiar.

À minha filha Bruna (*in memoriam*), minha saudade diária, luz que segue iluminando meus dias com sua memória viva.

Aos meus filhos, André Júnior e Eduardo, que são as minhas maiores inspirações, razão do meu esforço diário, da minha esperança no futuro e da minha coragem para seguir sempre em frente.

Ao meu companheiro de vida, André, por sua presença constante, conselhos e apoio em todos os momentos.

E aos meus irmãos, Célio, Júnior, José Luiz e Agilza, com gratidão pelos laços que me fortalecem.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, proteção e pela permissão para realizar este sonho, sempre no tempo d'Ele.

À minha mãe, Joana Alves Rodrigues (*in memorian*) e ao meu pai, Leonias Alves Rodrigues (*in memorian*), cujos valores, exemplos e amor permanecem vivos em mim e sustentam cada conquista.

Ao meu esposo, André Luís Mattos de Castro, e aos meus filhos, André Luís Mattos de Castro Júnior, Eduardo Rodrigues Mattos de Castro e Bruna Rodrigues de Castro (*in memorian*), por serem minha base, minha motivação e minha maior fonte de amor e inspiração.

Aos meus irmãos, Célio, Júnior, José Luiz e Agilza, juntamente com os meus sobrinhos (as) e cunhadas por caminharem comigo com tanto carinho, força e cumplicidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Everlon Cid Rigobelo, pelos valiosos ensinamentos, paciência, humanidade e pela confiança depositada no meu trabalho. Agradeço imensamente pela oportunidade de aprendizado, crescimento e realização.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Osania Emerenciano Ferreira, cuja orientação segura, generosidade e apoio incondicional foram fundamentais para a conclusão deste doutorado. Sou profundamente grata por tudo que fez por mim.

À Banca Examinadora, pelo tempo e atenção dispensados, e pelas relevantes contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Ao Arthur César Monico, pelo suporte dedicado e pela colaboração na condução dos experimentos.

Ao Prof. Dr. Alan Rodrigues Teixeira Machado, pela execução das análises de RMN, bem como pela disponibilidade e atenção dedicadas à sua explicação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, APQ-03110-22) e à Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) pelo apoio financeiro e pelas bolsas de estudo concedidas.

À Facility BioAnalítica NEPS-DQ da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pelo suporte técnico nas análises de RMN realizadas neste trabalho.

À Brunozzi Agribusiness, pelo apoio técnico, essencial ao desenvolvimento da pesquisa.

À Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Frutal, pela estrutura e espaço cedidos para a realização dos experimentos.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Jaboticabal, pela formação sólida e pela oportunidade de me tornar Doutora.

E, por fim, a cada pessoa que, com gestos pequenos ou grandes, ajudou a construir este capítulo da minha história.

Agradeço!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 A cultura da soja (<i>Glycine max</i> L.)	2
2.2 Produção de esterco bovino e a compostagem.....	4
2.3 Relevância e disponibilidade de fósforo	5
2.4 Agricultura regenerativa e a compostagem	7
2.5 Influência da matéria orgânica no sistema solo-microbiota-planta.....	8
2.6 Indicadores microbiológicos do solo	10
2.7 Metabolômica	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Preparação do composto	14
3.2 Caracterização do solo usado no experimento.....	15
3.3 Delineamento experimental	15
3.3.1 Experimento em microcosmos	15
3.3.2 Experimento em vasos	16
3.4 Avaliações realizadas	17
3.4.1 Carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio (N)	17
3.4.2 Carbono da biomassa microbiana (CBM)	18
3.4.3 Respiração basal do solo (RBS)	19
3.4.4 Quociente metabólico (qCO ₂).....	19
3.4.5 Quociente microbiano (qMic).....	19
3.4.6 Atividade enzimática da desidrogenase (AD)	20
3.4.7 Fitotoxicidade e germinação.....	20
3.4.8 Biometria e biomassa das plantas.....	21
3.4.9 Respostas fisiológicas	22
3.4.10 Preparação do tecido vegetal para análise por ressonância magnética nuclear de hidrogênio	23
3.4.11 Análise metabolômica por ressonância magnética nuclear de hidrogênio (RMN de ¹ H).....	23
3.4.12 Análise estatística e quimiométrica dos dados	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Caracterização inicial dos materiais	25
4.1.1 Descrição do composto	25
4.1.2 Composição química do solo usado no experimento.....	26
4.2 Parâmetros microbiológicos e bioquímicos do solo	27

4.2.1 Carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio(N)	27
4.2.2 Carbono da biomassa microbiana (CBM), atividade respiratória (AR), quociente metabólico (qCO ₂), quociente microbiano (qMic), atividade enzimática da desidrogenase (AD).....	31
4.3 Fitoxidade e germinação	35
4.4 Biometria e biomassa das plantas	36
4.4.1 Comprimento da raiz, altura, número de nódulos, número de flores e número de trifólios	37
4.4.2 Biomassa das plantas	39
4.5 Respostas fisiológicas.....	42
4.5.1 Fluorescência da clorofila.....	42
4.5.2 Conteúdo relativo de água (CRA) e extravasamento de eletrólitos (EL)	44
4.6 Análise metabolômica por ressonância magnética nuclear de Hidrogênio (RMN de ¹ H).....	46
4.6.1 RMN de ¹ H das plântulas de <i>Glycine max</i> L.	46
4.6.2 RMN de ¹ H das plantas de <i>Glycine max</i> L.	50
5 CONCLUSÃO.....	56
6 REFERÊNCIAS	56

INTERAÇÕES DE COMPOSTO À BASE DE ESTERCO BOVINO NO SISTEMA SOLO-MICROBIOTA-PLANTA EM CULTIVO DE SOJA

RESUMO - A aplicação de matéria orgânica via compostagem é uma estratégia promissora para melhorar atributos do solo e o desempenho da soja (*Glycine max* L.). Este estudo avaliou os efeitos de diferentes doses (0, 1, 3 e 5% m/m) de composto à base de esterco bovino, fosfato mineral e inoculantes biológicos nos sistemas composto-solo e solo-microbiota-planta, em condições controladas. Foram conduzidos dois ensaios: (i) microcosmos em frascos de vidro; (ii) cultivo em vasos de 10 L, incluindo tratamento adicional com adubação química. As análises contemplaram parâmetros microbiológicos — Carbono Orgânico Total (COT), Carbono de Biomassa Microbiana (CBM), Atividade da Desidrogenase (AD), Respiração Basal do Solo (RBS), quociente metabólico (qCO_2) e quociente microbiano ($qMic$) —, parâmetros fisiológicos — Conteúdo Relativo de Água (CRA), Extravasamento de Eletrólitos (EL) e fluorescência da clorofila —, biométricos, germinação, testes fitotóxicos e metabolômica foliar por Ressonância Magnética Nuclear de hidrogênio (RMN de 1H). No ensaio em microcosmos, a dose de 5% promoveu aumentos expressivos no COT (170,5%), RBS (685,6%) e AD (468,6%), enquanto a dose de 1% elevou o CBM (247,4%) e o $qMic$ (191,7%) em relação ao controle. A análise de componentes principais indicou modulação dose-dependente no perfil metabólico, associando a dose de 1% à trigonelina, acetato e sacarose, e as doses de 3% e 5% ao GABA e aminoácidos essenciais. As três doses testadas não apresentaram fitotoxicidade, com germinação superior a 94%. No ensaio em vasos, aos 30 dias, a dose de 5% aumentou o COT em 899,2% frente ao controle e, aos 60 dias, manteve teor 79,1% superior ao controle e 129,7% maior que a adubação química. O CBM foi mais elevado com 1% aos 30 dias (54,6% acima do controle), enquanto o menor qCO_2 ocorreu com 1% (30 dias) e com adubação química (60 dias), sugerindo menor estresse microbiano. O controle apresentou maior $qMic$ aos 30 dias (1,607%) e aos 60 dias a adubação química obteve o melhor resultado (11,54%). Entre os parâmetros fisiológicos, não houve diferença estatística para a fluorescência da clorofila. Já o EL foi reduzido em até 44,7% com a compostagem a 5% aos 60 dias, indicando maior integridade de membranas. Nos parâmetros biométricos, a dose de 1% m/m apresentou maior número de nódulos (470,6%) e trifólios (123,8%) aos 30 dias, ambos com diferença estatística significativa em relação ao controle. Na biomassa, observaram-se aumentos significativos na biomassa fresca com 5% m/m (278,5%) e na biomassa radicular seca com 3% m/m aos 30 dias, e na biomassa de vagens com 5% m/m (182,2%) aos 60 dias. A metabolômica foliar mostrou alterações em sacarose, ácido cítrico, asparagina e pinitol, confirmando respostas dose-dependentes. Os resultados evidenciam que o composto orgânico, especialmente nas doses de 1% e 5%, melhora atributos microbiológicos do solo e desempenho produtivo da soja. Embora a adubação química tenha se destacado em alguns parâmetros, a compostagem mostrou maior potencial para acúmulo de carbono, redução de estresse fisiológico e promoção do crescimento vegetal, representando uma alternativa eficiente ou

complementar ao manejo convencional, de acordo com os objetivos agronômicos ou ecológicos.

Palavras-chave: Matéria orgânica, parâmetros do solo, solo microbiano, reciclagem de nutrientes

INTERACTIONS OF BOVINE MANURE-BASED COMPOST IN THE SOIL-MICROBIOTA-PLANT SYSTEM IN SOYBEAN CULTIVATION

ABSTRACT - The application of organic matter through composting is a promising strategy for improving soil properties and soybean (*Glycine max* L.) performance. This study evaluated the effects of different rates (0, 1, 3, and 5% w/w) of compost based on cattle manure, mineral phosphate, and biological inoculants on compost–soil and soil–microbiota–plant systems under controlled conditions. Two experiments were conducted: (i) microcosms in glass flasks; (ii) cultivation in 10-L pots, including additional treatment with chemical fertilizer. The analyses included microbiological parameters — Total Organic Carbon (TOC), Microbial Biomass Carbon (MBC), Dehydrogenase Activity (AD), Soil Basal Respiration (SBR), metabolic quotient (qCO_2) and microbial quotient ($qMic$) —, physiological parameters — Relative Water Content (RWC), Electrolyte Leakage (EL) and chlorophyll fluorescence —, biometric parameters, germination, phytotoxicity tests and leaf metabolomics by Hydrogen Nuclear Magnetic Resonance (1H NMR). In the microcosm assay, the 5% dose promoted significant increases in TOC (170.5%), SBR (685.6%) and AD (468.6%), while the 1% dose increased MBC (247.4%) and $qMic$ (191.7%) compared to the control. Principal component analysis indicated dose-dependent modulation of the metabolic profile, associating the 1% dose with trigonelline, acetate, and sucrose, and the 3% and 5% doses with GABA and essential amino acids. The three doses tested showed no phytotoxicity, with germination exceeding 94%. In the pot experiment, at 30 days, the 5% dose increased TOC by 899.2% compared to the control, and at 60 days, it maintained a level 79.1% higher than the control and 129.7% higher than the chemical fertilizer. The MBC was highest with 1% at 30 days (54.6% above the control), while the lowest qCO_2 occurred with 1% (30 days) and with chemical fertilizer (60 days), suggesting less microbial stress. The control showed the highest $qMic$ at 30 days (1.607%), and at 60 days, chemical fertilization obtained the best result (11.54%). Among the physiological parameters, there was no statistical difference for chlorophyll fluorescence. EL was reduced by up to 44.7% with 5% composting at 60 days, indicating greater membrane integrity. In the biometric parameters, the 1% m/m dose showed the highest number of nodules (470.6%) and trifoliate (123.8%) at 30 days, both with a statistically significant difference in relation to the control. Regarding biomass, significant increases were observed in fresh biomass at 5% m/m (278.5%) and in dry root biomass at 3% m/m at 30 days, and in pod biomass at 5% m/m (182.2%) at 60 days. Leaf metabolomics showed changes in sucrose, citric acid, asparagine, and pinitol, confirming dose-dependent responses. The results demonstrate that organic compost, especially at doses of 1% and 5%, improves soil microbiological attributes and soybean yield performance. Although chemical fertilizers excelled in some parameters, composting showed greater potential for carbon accumulation, reducing physiological stress, and promoting plant growth, representing an efficient alternative or complement to conventional management, according to agronomic or ecological objectives.

Keywords: Organic matter, soil parameters, microbial soil, nutrients cycling

1 INTRODUÇÃO

O setor agrícola enfrenta desafios crescentes relacionados à sustentabilidade e à segurança alimentar, diante da alta demanda global por alimentos e da redução das terras agricultáveis (Ospina e Collazos, 2025). Nesse contexto, práticas agrícolas sustentáveis tornam-se essenciais para manter a produtividade e conservar os recursos naturais.

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas mais importantes do Brasil, com produção estimada em 147,38 milhões de toneladas na safra 2023/2024, consolidando o país como maior produtor mundial da oleaginosa (CONAB, 2024). Entretanto, sua produtividade pode ser comprometida por fatores como estresses climáticos, pragas, doenças e, principalmente, a baixa fertilidade de solos, especialmente no Cerrado, onde predominam solos ácidos, degradados e pobres em matéria orgânica e nutrientes essenciais (Souza et al., 2024; Laroca et al., 2018).

A utilização de composto orgânico, especialmente à base de esterco bovino, tem se mostrado uma estratégia eficaz para restaurar a fertilidade e a saúde do solo, promovendo melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas. Além de elevar os teores de matéria orgânica e nutrientes, esse tipo de composto estimula a microbiota do solo, criando condições mais favoráveis ao crescimento vegetal (Urrea et al., 2019; Brichi et al., 2023). Quando associado ao fosfato natural, fonte alternativa de fósforo, pode ainda acelerar a mineralização da matéria orgânica e aumentar a disponibilidade de fósforo assimilável, essencial para o desenvolvimento radicular, a fotossíntese e o crescimento da planta (López De Herrera et al., 2021).

O solo é um sistema dinâmico cuja funcionalidade depende da atividade de microrganismos benéficos, como bactérias, fungos e actinobactérias. Esses organismos participam de processos-chave como a ciclagem de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica e a promoção do crescimento vegetal. A adição de compostos orgânicos pode modular essas comunidades microbianas, fortalecendo as interações no sistema solo–microbiota–planta (Zhang et al., 2024; Lin et al., 2025).

Para compreender esses efeitos, a avaliação de parâmetros microbiológicos é fundamental. Indicadores como o carbono orgânico total e o

carbono da biomassa microbiana estimam o carbono disponível e ativo no solo, enquanto a atividade da desidrogenase e a respiração basal informam sobre o metabolismo microbiano. Já os quocientes metabólicos (qCO_2 e $qMic$) ajudam a avaliar a eficiência do uso de carbono pela microbiota e a estabilidade do sistema solo (Liu et al., 2024; Cong et al., 2025).

Estudos na cultura da soja indicam que o uso de composto orgânico favorece não apenas a nutrição e a estrutura do solo, mas também o desempenho fisiológico e bioquímico das plantas, resultando em maior vigor e produtividade (Khan et al., 2024; Indriani et al., 2021). Abordagens analíticas como a Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de 1H) têm se destacado como ferramentas sensíveis para detectar alterações metabólicas em tecidos vegetais, revelando as respostas das plantas ao ambiente e ao manejo nutricional (Coutinho et al., 2018).

Desse modo, objetivou-se com o presente estudo avaliar os efeitos da aplicação de composto orgânico à base de esterco bovino, em diferentes doses, sobre o sistema solo–microbiota–planta em cultivo de soja. Foram conduzidos experimentos em condições controladas, com duas abordagens: (a) análise do sistema composto–solo em microcosmos, com foco na atividade microbiana e no perfil metabólico de plântulas aos 15 dias; e (b) avaliação das respostas microbianas, fisiológicas, biométricas aos 30 e 60 dias e do perfil metabólico das plantas aos 60 dias após o plantio, utilizando a RMN de 1H como ferramenta investigativa. As nossas hipóteses foram: (i) o composto orgânico estimulará a atividade microbiana do solo; (ii) o composto influenciará positivamente a eficiência fotossintética e os parâmetros fisiológicos da soja e ((iii) diferentes doses de composto modularão o metabolismo vegetal de forma dose-dependente, promovendo alterações mensuráveis no perfil de metabólitos relacionados ao crescimento e à resposta ao estresse.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja (*Glycine max* L.)

A soja é uma planta de origem asiática, cujo cultivo é bastante diferente se for comparado há uns cinco milênios atrás em que eram plantas tipo rasteiras desenvolvidas próximas a rios e lagos, nomeada de soja selvagem (EMBRAPA,2024). Com o passar dos anos, a sua evolução começou com o surgimento de novas plantas aperfeiçoadas pelos chineses (Garcia Lucas et al., 2021).

No Brasil, a soja foi introduzida há cerca de 142 anos. Os primeiros materiais genéticos foram trazidos dos EUA em 1882 e testados na Bahia pelo professor Gustavo Dutra, da Escola de Agronomia da Bahia. Posteriormente, o grão foi estudado em São Paulo, em 1891, e oficialmente inserida no Rio Grande do Sul em 1914, em regiões de clima similar às áreas cultivadas nos EUA (FORBES,2023).

Atualmente, a soja é o principal grão produzido no país, com grande contribuição na economia nacional. O Brasil é o maior produtor, com 169,4 milhões de toneladas, em uma área de 47,6 milhões de hectares na safra 2024/2025 (CONAB, 2025).

O cultivo dessa cultura enfrenta diversas dificuldades que podem impactar significativamente a sua produtividade e a rentabilidade. Dentre as principais, destacam-se a vulnerabilidade às condições climáticas adversas, como secas prolongadas ou excesso de chuvas, que podem comprometer o desenvolvimento das plantas. Ademais, a incidência de pragas e doenças, que exige o constante monitoramento e aplicação de defensivos agrícolas, aumentando os custos de produção e o risco de contaminação ambiental. Outro desafio é a questão da fertilidade do solo, que carece de uso intensivo de corretivos e fertilizantes para manter a capacidade produtiva ao longo dos anos (Moraes, 2011; Bradley et al., 2021).

A degradação ambiental decorrente do atual modelo agrícola é amplamente reconhecida, evidenciando a necessidade de integrar a produtividade e a qualidade da agricultura brasileira a uma abordagem ambientalmente sustentável. Nesse contexto, sistemas diversificados de produção baseados na reciclagem de matéria orgânica por meio da compostagem requerem maior investigação sob a perspectiva técnica e científica (Silva et al., 2019).

A microbiota do solo, incluindo bactérias, fungos e actinobactérias, desempenha papéis essenciais na ciclagem de nutrientes, na decomposição da matéria orgânica e no aumento do crescimento das plantas. A composição e a atividade dessa microbiota são afetadas por fatores físicos, químicos e biológicos do solo, incluindo sua estrutura, teor de matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes. Nessas condições, a adição de composto representa uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade do solo, pois é capaz de estimular a atividade microbiana benéfica e favorecer interações simbióticas que contribuem para a saúde das plantas. A compreensão dessas interações no sistema solo-microbiota-plantas é essencial para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis capazes de aumentar a produtividade e a resiliência das culturas sem afetar a integridade dos ecossistemas (Li et al., 2025).

2.2 Produção de esterco bovino e a compostagem

Os sistemas de produção animal, em especial a criação de bovinos leiteiros, produzem um elevado número de resíduos. Outro fato que merece atenção é a composição desses resíduos, em razão do pouco aproveitamento dos alimentos consumidos pelos animais, que oscila, cerca de 40 % para o nitrogênio, fósforo e potássio; e em torno de 60% de matéria orgânica. Assim, boa parte dos constituintes alimentares são eliminados pelas dejeções dos animais. Esses constituintes dos dejetos caracterizam custos e mantêm considerável potencial fertilizante e impacto agressivo ao meio ambiente (Konzen, 1999).

O último censo de rebanho bovino do Brasil, divulgado pelo IBGE em 2023, registrou um novo recorde, com 238,6 milhões de cabeças de gado, representando crescimento de 1,6% em relação a 2022. Quando comparado ao censo demográfico de 2023, que apontou uma população de 203,1 milhões de pessoas, observa-se que o rebanho bovino foi 17,48% superior à população humana do país (IBGE, 2023).

Para ilustrar, a produção diária de esterco (fezes e urina) dos bovinos leiteiros é aproximadamente 10% de seu peso corporal, o que significa, geralmente, uma quantidade de 45 a 48 kg/vaca/dia. Já bovinos de corte confinados geram cerca de 30 a 35 kg/cabeça/dia (konzen e Alvarenga, 2002).

Vale ressaltar que a quantidade e composição do esterco varia de acordo com a idade, raça e alimentação recebida pelo rebanho.

A compostagem consiste em um processo de reciclagem de materiais orgânicos, como folhas, restos de comida, serragem, esterco, dentre outros para a produção de adubo ou fertilizantes orgânicos. A compostagem pode ser realizada em forma de pilhas ou leiras com a mistura de diferentes materiais. Durante esse processo, os resíduos são convertidos em substratos orgânicos, adubos ou fertilizantes através dos insetos, pequenos animais e microrganismos, como fungos e bactérias. Dessa forma, o composto é incorporado ao solo, visando melhorar as suas capacidades físicas e químicas na procura de melhores produções (Diniz-Filho et al., 2007).

A compostagem com esterco bovino perdeu destaque com a chegada da adubação mineral no século 19. No entanto, nas últimas décadas, tem ganhado nova relevância devido ao aumento da preocupação com o meio ambiente, a busca por uma alimentação mais saudável e a necessidade de dar um destino adequado às grandes quantidades de esterco geradas em alguns países (Sampaio et al., 2007).

A utilização de esterco bovino, além de suprir as necessidades nutricionais das plantas, desempenha um papel crucial na melhoria da estrutura do solo. Ao incorporar matéria orgânica, este procedimento promove a agregação das partículas do solo, aumentando sua porosidade e, conseqüentemente, a capacidade de retenção de água. Além do mais, contribui significativamente para a redução das perdas de solo por erosão, pois melhora a resistência da sua superfície contra o impacto das chuvas. Outro benefício primordial é o favorecimento do controle biológico, uma vez que a matéria orgânica serve como fonte de alimento e habitat para uma diversidade de organismos benéficos, que auxiliam no equilíbrio e na saúde dos ecossistemas agrícolas (Wu et al., 2025).

2.3 Relevância e disponibilidade de fósforo

O fósforo (P) é essencial para o metabolismo das plantas, desempenhando um papel fundamental na transferência de energia celular, na respiração e na fotossíntese (Rosolem e Tavares, 2006). Ele está presente em

ésteres de carboidratos, fosfolipídios, coenzimas e ácidos nucleicos nas plantas. Em plantas anuais com deficiência de P, observa-se uma emergência e crescimento lentos; as folhas tornam-se verde-escuras, com pecíolos e nervuras arroxeados, especialmente na face inferior; o crescimento das raízes é comprometido, e as plantas ficam estioladas ou com o desenvolvimento severamente prejudicado (Santos et al., 2015).

Em geral, segundo Leite et al. (2016), os solos brasileiros contêm elevados níveis de óxidos de ferro, alumínio e argila do tipo caulinita, além de um alto grau de intemperismo e baixos teores de matéria orgânica. A existência desses óxidos resulta na retenção dos íons fosfato, tornando o P indisponível para as plantas. Por essa razão, é essencial a adição de P por meio da aplicação de fertilizantes fosfatados, uma vez que os níveis adequados desse nutriente no vegetal são indispensáveis para um bom rendimento de grãos, que em conjunto com a adubação orgânica pode elevar a produção na agricultura (Schoninger et al., 2013).

De acordo com Oliveira Júnior et al. (2008), a aplicação de fosfato sobre o esterco reduz as perdas de amônia (NH_3), consequentemente retendo o nitrogênio, macronutriente fundamental para melhorar a produtividade das culturas. A perda de nitrogênio pode ocorrer tanto nos compostos orgânicos quanto nos fertilizantes nitrogenados. A liberação de amônia ocorre quando o teor de nitrogênio no resíduo é maior que 2,4%, pois qualquer quantidade que exceda o necessário para os microrganismos decomporem o material orgânico será descartada na forma de NH_3 .

Para uma melhor compreensão, a quantidade de fósforo em um solo é dividida em inorgânica (Pi) e orgânica (Po), conforme a natureza do composto ao qual esse elemento está ligado. As frações orgânicas e inorgânicas do fósforo na superfície podem funcionar como fonte ou dreno para a solução do solo, dependendo de suas características mineralógicas e das condições ambientais. Além das quantidades, fatores como o teor e tipo de argila, o pH, o manejo da adubação fosfatada e o teor de matéria orgânica do solo também influenciam diretamente a disponibilidade desse elemento (ILSA, 2020).

Além disso, a disponibilidade de fósforo também pode ser influenciada pela atividade microbiana no solo. Conforme divulgado por Franzini et al. (2009), a quantidade de P presente na biomassa microbiana do solo pode aumentar com

a adição de fertilizantes, já que a biomassa atua como um dreno deste elemento no solo.

2.4 Agricultura regenerativa e a compostagem

O aumento da demanda por alimentos e o crescimento populacional impõem diversos desafios e oportunidades para a produção agrícola. A sociedade atual busca tornar as práticas agropecuárias mais eficientes enquanto preserva e, até mesmo, restaura o meio ambiente. O mau uso da terra tem causado problemas como mudanças climáticas, degradação dos solos e perda de biodiversidade, o que torna essencial a restauração da natureza para enfrentar possíveis crises no ecossistema (Searchinger et al., 2013).

Assim, a agricultura regenerativa surge como uma abordagem inovadora e necessária para enfrentar os desafios ambientais e socioeconômicos contemporâneos. Baseada em princípios como a regeneração do solo, a biodiversidade, o sequestro de carbono e o manejo holístico dos recursos naturais. Essa prática visa não apenas a sustentabilidade, mas também a revitalização dos ciclos ecológicos naturais, proporcionando benefícios ambientais e sociais de longo prazo (Schreefel et al., 2020).

A expressão agricultura regenerativa foi criada na década de 80, nos Estados Unidos por Robert Rodale, que se fundamentou em teorias de hierarquia ecológica para investigar os processos de regeneração dos sistemas agrícolas, ao longo do tempo (Gazola et al., 2017). Esse conceito visa à regeneração e manutenção das culturas e de todo o sistema de produção alimentar, incluindo as comunidades rurais e os consumidores, de forma a aumentar sua resiliência, como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1-Princípios da agricultura regenerativa. Fonte: Instituto de Agricultura Regenerativa, 2022.

Nesse viés, um dos mecanismos desse tipo de agricultura é o desenvolvimento e a utilização de compostagem. No caso da regeneração de um solo empobrecido, os procedimentos possuem o objetivo de disponibilizar água, alimento e ar, podendo torná-lo apto para o plantio. Em solos agrícolas erodidos, por sua vez, é preciso recolocar o seu teor em nutrientes, que vão auxiliar o seu processo de regeneração. Vale ressaltar, que a agricultura regenerativa valoriza os microrganismos presentes no solo, já que eles são fundamentais para a manutenção da terra (ECYCLE, 2024).

2.5 Influência da matéria orgânica no sistema solo-microbiota-plantas

A matéria orgânica do solo (MOS) é constituída principalmente por compostos de carbono e desempenha um papel crucial no comportamento físico do solo, influenciando significativamente o processo de recuperação estrutural. O carbono orgânico está intimamente relacionado à qualidade do solo, pois contribui para a cimentação da estrutura, atua como regulador do pH, participa da complexação de elementos e da capacidade de troca de cátions, além de melhorar a disponibilidade de água no solo (Campos et al., 2016).

A junção das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) formam partículas secundárias, denominados de agregados. Os agregados são elementos fundamentais da estrutura do solo, sendo importante na manutenção da porosidade e aeração do perfil, no crescimento das plantas e da população microbiana, na infiltração da água e no controle e intensidade dos processos erosivos (Oades, 1984; Krause et al., 2020).

A variação no comprimento das estruturas dos agregados cria nichos heterogêneos; por exemplo, em certas regiões, há um limite na difusão de água,

oxigênio e gases, o que seleciona microrganismos capazes de interagir com o carbono orgânico nas condições específicas desse ambiente. Assim, formam-se microbiomas e nichos profundamente especializados (Yang et al., 2017; Wilpiseski et al., 2019).

Certos mecanismos de interação entre microrganismos e partículas do solo já foram identificados. Um dos principais é a produção de polissacarídeos extracelulares, geralmente de origem bacteriana, que interagem com as partículas de argila e facilitam a adesão das células microbianas ao solo (Liu et al., 2025; Cardoso e Andreote, 2016). Além disso, uma substância com função similar, mas produzida por fungos micorrízicos arbusculares, é a glomalina. Essa glicoproteína promove a adesão das partículas nos agregados do solo, contribuindo também para o sequestro de carbono (Vasconcellos et al., 2013; Cardoso e Andreote, 2016).

O solo, mesmo sendo um local oligotrófico, abriga uma grande quantidade de vida. Estima-se que cerca de 0,5% do volume do solo seja composto por microrganismos como fungos, bactérias, arqueas, protozoários e vírus, os quais desempenham papéis fundamentais em diversos processos no solo. A título de exemplo, os microrganismos atuam na decomposição da matéria orgânica, alterando os nutrientes presentes no solo e para plantas, intervindo nas propriedades físicas do mesmo. A microbiota participa da formação da estrutura do solo, controla a disponibilidade de nutrientes às plantas pela mediação nos ciclos biogeoquímicos dos elementos, incluindo a fixação biológica do nitrogênio e a ciclagem de fósforo, produção de hormônios vegetais, controle de patógenos e, em cenários de seca e altas temperaturas, os microrganismos podem ajudar as plantas a desenvolver tolerância a estresses ambientais (Lugtenberg e Kamilova, 2009; Jansson e Hofmockel, 2020).

A diversidade microbiana está diretamente ligada a um conjunto de fatores abióticos, como água, atmosfera, pH, temperatura, potencial redox, fontes nutricionais, dentre outros e bióticos, como a genética microbiana e a interação entre os microrganismos, que possibilitam o desenvolvimento microbiano e a formação da comunidade viva do solo. A interação desses fatores influencia de maneira decisiva a ecologia, a atividade e a dinâmica populacional dos microrganismos no solo (Moreira e Siqueira, 2009; Wilpiseski et al., 2019).

A adição de matéria orgânica ao solo é um dos principais fatores que influenciam a diversidade microbiana, a qual está diretamente relacionada à disponibilidade e variedade de nutrientes locais (Ramadan et al., 2025). Embora essas mudanças possam trazer benefícios, como o aumento da pluralidade dos microrganismos, também podem ter efeitos negativos, como a extinção de espécies raras e a predominância de espécies mais abundantes, o que pode reduzir a redundância funcional do sistema (Qiu et al., 2022; Garcia et al., 2024). Assim, o tipo de matéria orgânica aplicada é o principal mediador dos efeitos no microbioma do solo, considerando a ampla gama de fontes e tipos disponíveis para uso na agricultura. Diferentes tipos de matéria orgânica podem ser utilizados na tentativa de recuperar a fertilidade do solo, incluindo, comumente, resíduos animais, restos vegetais e materiais compostados (Cesarano et al., 2017).

A aplicação de esterco ou de sua fração líquida também altera as comunidades microbianas do solo. Quevedo et al. (2023) ressaltaram que a utilização de esterco a longo prazo pode melhorar o microbioma do solo. Porém, os autores indicam que a aplicação da fração líquida proveniente do esterco diminuiu a abundância de fungos presentes no solo, e impacta a estruturação da microbiota local.

O entendimento dessas interações deverá cada vez mais fornecer subsídios para a produção sustentável de alimentos, tendo como base os mais diversos processos microbianos desenvolvidos.

2.6 Indicadores microbiológicos do solo

Indicadores de qualidade do solo são atributos que quantificam ou refletem o estado ambiental. Entre eles, os indicadores biológicos do solo se destacam por sua alta sensibilidade às alterações no ambiente causadas por atividades humanas. Em certas circunstâncias, modificações nos atributos microbiológicos do solo podem preceder mudanças nas propriedades químicas e físicas, refletindo em um distúrbio ecológico ou um elevado nível de produtividade do ecossistema (Silva et al., 2010; Munoz-Rojas, 2018).

Pesquisas destacam que os indicadores biológicos, como biomassa microbiana do solo (BMS), respiração basal do solo, atividade enzimática e

quociente metabólico, são os mais empregados para verificar a qualidade do solo durante as avaliações dos processos biológicos que ocorrem no ambiente (Islam e Weil, 2000; Song et al., 2021).

Cerca de 60 a 80% da matéria orgânica do solo (MOS) é composta por microrganismos (Liang e Balser, 2011). Desse modo, a biomassa microbiana (BMS) é a parte viva e mais ativa da matéria orgânica do solo, constituída principalmente por fungos e bactérias. Esses exercem papel fundamental em vários processos, como na decomposição dos resíduos orgânicos, nos fluxos de energia, na ciclagem de nutrientes, na degradação de compostos xenobióticos, na síntese de matéria orgânica do solo (Khan et al., 2024)

Os microrganismos heterotróficos encontrados no solo, segundo Pulrolnik (2009), são responsáveis pela decomposição primária do material vegetal disposto sobre o solo, utilizando em torno de 95% do carbono desse material como fonte de energia para sua subsistência. E, dessa maneira, intervêm tanto na transformação da matéria orgânica, como na estocagem do carbono e nutrientes pelos processos de mineralização e imobilização. Assim, a BMS é também designada como carbono da biomassa microbiana (C-BMS), sendo considerada o compartimento central do ciclo do carbono. Este reservatório possui, em torno, de 2 a 5% do carbono (C) orgânico do solo e de 1 a 5% do nitrogênio (N) total do solo (Zhang et al., 2025).

De acordo com as pesquisas, há uma redução da BMS em ambientes mais desestabilizados, como pastagem e plantio convencional, quando correlacionados à vegetação natural (Mganga et al., 2024). Logo, a avaliação da BMS é aplicada para obter elucidações rápidas acerca de possíveis mudanças nas propriedades orgânicas do solo e constatar variações acarretadas por cultivos ou por desmatamentos (Zhu et al., 2021).

Vale destacar, que a determinação da BMS deve ser diferenciada de sua atividade, pois ela representa a massa total de microrganismos vivos presentes no solo, e não uma medida direta da atividade microbiana. Considerando a população microbiana como uma entidade única, é essencial a aplicação de métodos complementares que permitam avaliar a atividade metabólica dos microrganismos no solo. Essas análises adicionais são fundamentais para fornecer uma compreensão mais precisa do estado metabólico da comunidade

microbiana, permitindo inferências sobre a dinâmica de processos biogeoquímicos e a saúde do solo (Prendergast-Miller e Jones, 2021).

Deste modo, a respiração basal do solo (RBS), que é estipulada como a soma total de todas as funções metabólicas dos microrganismos, em que o dióxido de carbono (CO_2) é produzido, tem sido um dos índices de qualidade do solo mais empregado (Irving et al., 2024). A RBS possui analogia com a quantidade de carbono presente no solo e também com as condições ambientais instaladas. Assim, o aumento na taxa de respiração pode ser entendido como uma característica desejável ao se considerar que a decomposição dos resíduos orgânicos irá oferecer nutrientes para as plantas, portanto, indicando alto nível de atividade microbiana, ou alguma situação de estresse, como diminuição de disponibilidade de substrato vegetal, ou existência de contaminante no solo (Liptzin et al., 2022; Guo et al., 2025). Consequentemente, essa variável não deve ser utilizada sozinha.

Salienta-se, que a MOS desempenha um papel crucial na manutenção da saúde do solo, influenciando suas propriedades físicas, químicas e biológicas. É uma fonte vital de nutrientes para as plantas e uma integrante chave para a agregação do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e resistência à erosão. Entre os principais indicadores da qualidade da MOS está o carbono orgânico total (COT), que representa a quantidade total de carbono presente na matéria orgânica do solo. O COT é um parâmetro fundamental na avaliação da fertilidade do solo e na sua capacidade de sequestro de carbono, atuando como um reservatório de carbono que pode mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Koorneef et al., 2024).

Outro parâmetro utilizado para avaliar a qualidade do solo é o quociente metabólico (qCO_2), proposto por Anderson e Domsch (1993). O qCO_2 é definido pela razão entre a respiração basal por unidade de biomassa microbiana do solo e por unidade de tempo. É uma medida que pode refletir o nível de estresse dos microrganismos do solo, sua eficiência na utilização de carbono e a qualidade do habitat no qual estão inseridos. Um aumento no qCO_2 , pode indicar um sistema em desequilíbrio, onde os microrganismos são menos eficientes na utilização de carbono devido a fatores como poluição, práticas agrícolas intensivas, ou mudanças nas condições ambientais, como a disponibilidade de nutrientes ou umidade. Em solos saudáveis e não perturbados, espera-se que o

qCO₂ seja baixo, indicando que a comunidade microbiana é eficiente na utilização do carbono para crescimento e manutenção, com uma menor proporção do carbono sendo perdida como CO₂ (Du et al., 2022).

Entre os elementos do solo, estão as enzimas, biomoléculas fundamentais que catalisam reações bioquímicas críticas para a ciclagem de nutrientes e a manutenção da fertilidade do solo. Elas são produzidas principalmente por microrganismos. As enzimas do solo desempenham papéis essenciais na decomposição da matéria orgânica, mineralização de nutrientes e transformação de compostos complexos em formas disponíveis para as plantas. Entre as enzimas de interesse no solo, destaca-se a desidrogenase, que é amplamente utilizada como um indicador da atividade microbiana e da qualidade do solo (Mukherjee et al., 2019).

A desidrogenase é uma enzima intracelular que está presente em todos os microrganismos vivos e participa dos processos de respiração celular, sendo fundamental no Ciclo de Krebs. Ela desempenha um papel importante na transferência de hidrogênio dos substratos para os aceptores, o que está diretamente relacionado à oxidação biológica da matéria orgânica. A atividade da desidrogenase no solo é um reflexo da atividade respiratória microbiana, pois é ativa apenas em células microbianas viáveis e metabolicamente ativas. Desta forma, a presença e a atividade de desidrogenase no solo indica uma comunidade microbiana saudável e ativa (Fuentes-Ponce et al., 2016).

2.7 Metabolômica

Nas últimas décadas, a metabolômica tem assumido um papel central nas investigações científicas, destacando-se entre as ciências ômicas. Essa abordagem visa a identificar e quantificar metabólitos em plantas e animais, fornecendo informações relevantes sobre o metabolismo de sistemas biológicos. O foco recai sobre moléculas de baixa massa molar (<1500 Da), componentes fundamentais das reações e vias metabólicas, que compõem o chamado metaboloma (Grijseels et al., 2024; Park et al., 2025).

Para uma avaliação precisa das alterações no conteúdo de pequenas moléculas em plantas, são empregadas técnicas analíticas robustas, como o perfilamento metabolômico (García-Pérez et al., 2025). Dentre os métodos mais

utilizados na metabolômica, destacam-se a cromatografia líquida e gasosa acopladas à espectrometria de massas (LC-MS/GC-MS), a eletroforese capilar, a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) e a ressonância magnética nuclear (RMN) (Han et al., 2025). As abordagens baseadas em RMN são especialmente vantajosas para análises não direcionadas de metabolomas a partir de amostras biológicas, pois oferecem alta precisão e seletividade, dispensando protocolos complexos de pré-purificação (Wang et al., 2022).

Dessa forma, a metabolômica configura-se como uma ferramenta estratégica para a compreensão integrada do metabolismo em sistemas biológicos complexos, como o solo-microbiota-planta. A seleção adequada entre estratégias e técnicas analíticas depende dos objetivos específicos do estudo, da natureza da amostra e dos recursos metodológicos disponíveis. No contexto desta pesquisa, voltada à avaliação de composto orgânico à base de esterco bovino em cultivo de soja, a metabolômica contribui de maneira significativa para a identificação de alterações metabólicas na planta, associadas à dinâmica microbiológica do solo e à disponibilidade de nutrientes, auxiliando na elucidação dos mecanismos bioquímicos envolvidos na interação entre os componentes do sistema (Li et al., 2025).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Preparação do composto

A produção do composto foi realizada na Agropecuária Brunozi, situada na zona rural de Pirajuba, MG a 19° 54' 25" S, 48° 42' 03" O e 534 m de altitude. O processo foi conduzido em um delineamento completamente casualizado e estruturado em leiras compostas por materiais orgânicos e minerais, incluindo esterco bovino, fosfato mineral (Calciphós 20%, produto comercial da Arko) e um mix de microrganismos contendo bactérias solubilizadoras de fosfato e fixadoras de nitrogênio.

A montagem das leiras iniciou-se com a disposição do esterco bovino, seguida da aplicação homogênea do fosfato na proporção 24:1 (esterco:fosfato). Até sete dias após a montagem, realizou-se a inoculação com a calda microbiana

previamente preparada. A partir da inoculação, as leiras passaram por revolvimentos mecânicos regulares, com hidratação conforme necessário, visando garantir as condições ideais de umidade (30–60%) e temperatura (< 70 °C) para a atividade microbiana e a solubilização dos nutrientes.

Durante o período de maturação, que durou 30 dias, foram realizadas até cinco revoluções com base no monitoramento da temperatura (duas medições semanais) e da umidade. Sempre que a temperatura se aproximava de 70 °C ou a umidade saía da faixa ideal, aplicava-se o revolvimento com ou sem adição de água, conforme a necessidade. Ao final do processo, obteve-se um composto estabilizado, adequado para aplicação nos experimentos.

3.2 Caracterização do solo usado no experimento

O solo utilizado foi coletado em área sem cultivo anterior, pertencente à Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Unidade Frutal, MG, localizada a 20° 01' 30" S, 48° 56' 27" O e 518,94 m de altitude. O material foi utilizado *in natura*, sem qualquer correção química. Após a coleta, o solo foi seco à temperatura ambiente por dois dias e, em seguida, peneirado em malha de 2 mm.

3.3 Delineamento experimental

3.3.1 Experimento em microcosmos

O experimento em microcosmos foi conduzido na Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) – Unidade Frutal. Inicialmente, a umidade do solo foi ajustada para 60% da capacidade de campo utilizando água destilada estéril, aplicada uniformemente em todos os tratamentos. Os microcosmos foram montados em frascos de vidro transparente com volume de 3 L, previamente autoclavados, cada um contendo a mistura de solo com composto orgânico, sendo considerados unidades experimentais (parcelas).

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 × 4, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em quatro doses de composto orgânico em base de massa (% m/m): 0,0% (controle), 1,0%, 3,0% e

5,0%. O total foi de 16 unidades experimentais, acrescidas de duas unidades controle adicionais (sem adição de composto), totalizando 18 microcosmos (Figura 1).

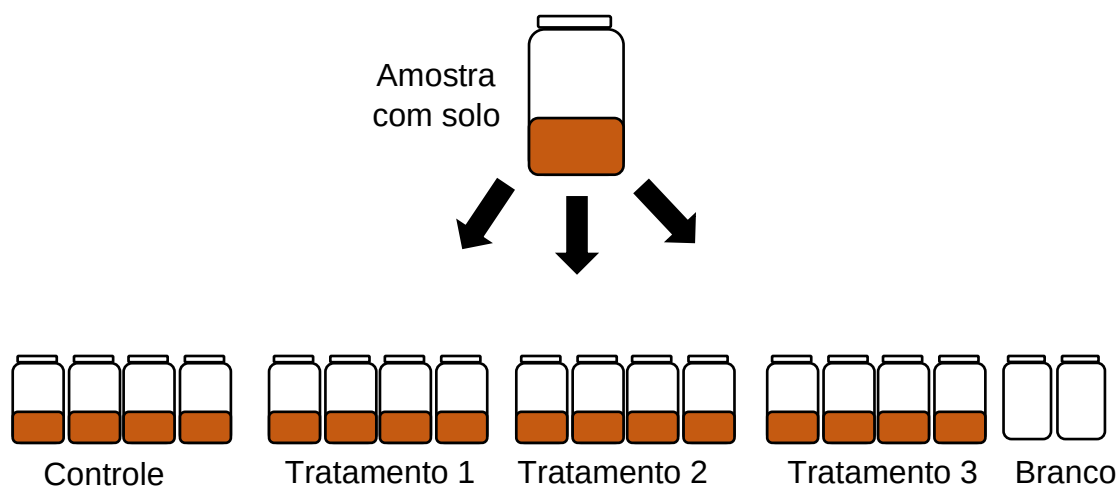


Figura 1. Sistema de microcosmo utilizando frascos de vidro transparente com mistura de solo+ composto nas concentrações em percentagem de massa (% m/m): 0,0 (controle); 1,0 (Tratamento 1); 3,0 (Tratamento 2); 5,0 (Tratamento 3). Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.2 Experimento em vasos

O experimento em vasos foi implementado na Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) – Unidade Frutal, em uma estufa agrícola, instalada sobre superfície nivelada e livre de sombreamento por vegetação arbórea (Figura 2). Foram utilizados vasos plásticos com capacidade de 10 litros, perfurados na base para permitir a drenagem e evitar a perda de solo. Cada vaso, contendo a mistura de solo e composto orgânico, foi considerado uma unidade experimental (parcela). O plantio foi realizado manualmente, com a deposição de três sementes por vaso da cultivar *Glycine max* L. (NS6909).

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 5×5 , totalizando 25 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram em cinco condições de adubação: T1 – controle (sem adição de composto), T2

– 1,0% de composto orgânico (m/m), T3 – 3,0%, T4 – 5,0% e T5 – adubação química convencional. Cada tratamento foi conduzido com cinco repetições. A condução experimental foi dividida em duas etapas: a primeira com avaliações realizadas aos 30 dias após a semeadura, e a segunda aos 60 dias.



Figura 2- Vasos de 10 L contendo a mistura de solo e composto com plantio de sementes de soja (*Glycine max* L.), cultivar NS6909. Fonte: Imagem da autora.

3.4 Avaliações realizadas

3.4.1 Carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio (N)

Realizado em ambos os experimentos (microcosmos e vasos). O COT foi determinado por oxidação úmida, conforme a metodologia descrita por Xie et al. (2012). Foram pesados 0,2 g de terra fina seca ao ar (TFSA), transferidos para tubos de digestão, aos quais foram adicionados 5 mL de solução de dicromato de potássio e 7,5 mL de ácido sulfúrico concentrado. As amostras foram digeridas em bloco digestor a 170 °C por 30 minutos. Após a digestão, o conteúdo dos tubos foi transferido para frascos de Erlenmeyer, onde se adicionaram água destilada e solução indicadora. A titulação foi realizada com solução de sulfato ferroso amoniacal a 0,2 mol L⁻¹. Foram preparadas seis amostras brancas nas mesmas condições, sendo três submetidas à digestão e

três mantidas sem aquecimento. O COT foi calculado com base no volume de titulante consumido pelas amostras e respectivos brancos, expressando-se os resultados em dag kg^{-1} , conforme a equação [Eq. (1)].

$$\text{COT} = \frac{A \times \text{MSF} \times 3 \times 100}{\text{Pa}}$$

em que,

A - Volume calculado (mL);

MSF - Molaridade do Sulfato Ferroso (mol L^{-1}), e

Pa - Peso da amostra (mg).

O teor de matéria orgânica (MO) foi estimado a partir dos valores de carbono orgânico total (COT), utilizando-se o fator de conversão 1,724 ($\text{MO} = \text{COT} \times 1,724$). Para a estimativa do teor de nitrogênio (N), aplicou-se a relação carbono/nitrogênio (C/N), considerando-se uma razão fixa de 20, ou seja, dividindo-se o valor de COT por 20.

3.4.2 Carbono da biomassa microbiana (CBM)

Aplicado em ambos os experimentos (microcosmos e vasos), o método de determinação do CBM seguiu o protocolo descrito por Gogoi et al. (2021). Foram pesados dois conjuntos de 20 g de solo em frascos de Erlenmeyer, sendo um submetido à irradiação em micro-ondas (amostra irradiada) e o outro mantido sem irradiação (amostra não irradiada). Em ambas as amostras foi adicionada solução extratora de sulfato de potássio, seguida de agitação em agitador horizontal por 30 minutos. Após esse período, o sobrenadante foi filtrado com papel de filtro quantitativo de baixa velocidade.

Para a titulação, foram pipetados 10 mL do extrato filtrado em frascos de Erlenmeyer, aos quais se adicionaram 2 mL de dicromato de potássio ($0,066 \text{ mol L}^{-1}$), 10 mL de ácido sulfúrico e 50 mL de água destilada. Após o resfriamento da solução, acrescentaram-se três gotas de indicador, e o excesso de dicromato foi titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal ($0,03 \text{ mol L}^{-1}$). Foram preparados seis brancos: três contendo a solução extratora e os demais reagentes, e três sem a adição da solução extratora. O CBM foi calculado com base na diferença entre os teores de carbono nas amostras irradiadas e não irradiadas, sendo os resultados expressos em $\mu\text{g g}^{-1}$ de C no solo.

3.4.3 Respiração basal do solo (RBS)

Avaliada tanto nos microcosmos como nos vasos, pelo método estático sugerido por Mendonça e Matos (2005). As amostras do solo foram incubadas junto com solução de NaOH a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, em recipiente fechado hermeticamente a 25°C . Após sete dias, o recipiente foi aberto por 15 minutos, para troca de ar com o ambiente. Foram pipetados 10 mL da solução de NaOH incubada em Erlenmeyer, e adicionaram-se 10 mL de cloreto de bário a $0,05 \text{ mol L}^{-1}$. A solução do Erlenmeyer foi titulada com HCl a $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ após a adição do indicador (fenolftaleína). A respiração do solo foi determinada em mg de carbono respirado em 100 cm^3 de solo.

3.4.4 Quociente metabólico ($q\text{CO}_2$)

Avaliado em ambos os experimentos (microcosmos e vasos). O $q\text{CO}_2$ foi determinado a partir da respiração basal do solo e pelo carbono da biomassa microbiana, conforme a [eq. (2)]. Sua unidade é expressa em $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ CO}_2 \text{ di}^{-1}$ (Anderson e Domsch, 1993).

em que,

$$q\text{CO}_2 = \frac{\text{RBS}}{\text{CBM}}$$

CBM

RBS - Taxa de respiração basal do solo ($\text{mg de C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), e

CBM - Carbono da biomassa microbiana ($\text{mg de CO}_2 \text{ kg}^{-1}$).

3.4.5 Quociente microbiano ($q\text{Mic}$)

Realizado em ambos os experimentos (microcosmos e vasos). O $q\text{Mic}$ foi calculado com base na relação entre o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o carbono orgânico total (COT), conforme a [eq. (3)] (Anderson e Domsch, 1993), sendo expresso em porcentagem.

$$q\text{Mi} = \frac{\text{CBM}}{\text{COT}}$$

em que,

CBM - Carbono da biomassa microbiana (mg kg^{-1}), e

COT - Carbono orgânico total

3.4.6 Atividade enzimática da desidrogenase (AD)

A AD foi determinada em ambos os experimentos (microcosmos e vasos), conforme o método descrito por Casida et al. (1964). Foram pesados 3 g de solo seco ($< 2 \text{ mm}$) em tubos de ensaio ($18 \times 180 \text{ mm}$), aos quais foram adicionados 0,03 g de carbonato de cálcio, 0,5 mL de cloreto de 2,3,5-trifeniltetrazólio (TTC) e 1,3 mL de água destilada. A mistura foi homogeneizada, os tubos vedados com filme plástico de PVC e incubados em banho-maria a 37°C por 24 horas. Após o período de incubação, foram adicionados 10 mL de metanol a cada tubo, com posterior agitação e filtração em papel filtro Whatman nº 42. O filtrado foi transferido para frascos de Erlenmeyer de 125 mL e a absorbância da solução foi medida em espectrofotômetro, com comprimento de onda de 485 nm.

As concentrações de trifenilformazan (TPF), formadas pela redução do TTC, foram determinadas com base em curva padrão construída com soluções contendo 0, 5, 10, 20, 30, 40 e $60 \mu\text{g mL}^{-1}$ de TPF. Os resultados foram expressos em μg de TPF por grama de solo seco por 24 horas ($\mu\text{g TPF g}^{-1}$ solo seco 24 h^{-1}).

3.4.7 Fitotoxicidade e germinação

Foram feitos testes preliminares de germinação de sementes de soja, com base na metodologia proposta por Brasil (2009), com adaptações. Utilizaram-se sementes de *Glycine max* L., cultivar NS6909, adquiridas no comércio local. A germinação foi conduzida em caixas do tipo Gerbox, confeccionadas em acrílico transparente ($11 \times 11 \times 3,5 \text{ cm}$). O substrato utilizado consistiu em papel de germinação umedecido com água destilada. Em cada caixa, foram distribuídas 25 sementes, em triplicata, seguindo arranjo uniforme de 5×5 . As sementes foram cobertas com 25 g da mistura de solo e composto orgânico, nas concentrações de 0% (controle), 1% m/m, 3% m/m e 5% m/m, e a umidade foi ajustada para 60% da capacidade máxima de retenção de água, utilizando água

destilada. As caixas foram mantidas em câmara de crescimento a 25 °C, sob fotoperíodo de 12 horas.

Aos 9 dias de incubação, foram quantificados o número de sementes germinadas e o comprimento médio das radículas em cada unidade experimental. A partir desses dados, foram calculados a Germinação Relativa (GR), o Crescimento Relativo da Radícula (CRR) e o Índice de Germinação (IG), conforme descrito por AOSA (1983), Emino e Warman (2004) e Gasco et al. (2016).

$$GR (\%) = \frac{N_B}{N_C} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: GR, N_B e N_C indicam a germinação relativa (%), o número de sementes germinadas no tratamento com o composto e o número médio de sementes germinadas no controle, respectivamente.

$$CRR (\%) = \frac{L_B}{L_C} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que: CRR, L_B e L_C indicam o crescimento médio relativo da radícula (%), o comprimento médio da radícula no tratamento com o composto e o comprimento médio da radícula no controle, respectivamente.

$$IG (\%) = \frac{GR \cdot CRR}{100} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que: IG, GR e CRR, indicam o índice de germinação (%), a germinação relativa (%) e o crescimento médio relativo da radícula (%), respectivamente. A interpretação dos valores de IG seguiu a escala de classificação qualitativa proposta por Belo (2011), com os seguintes critérios:

- IG > 100%: o material potencializa a germinação e o crescimento radicular;
- 80–100%: não fitotóxico; composto maturado;
- 60–80%: moderadamente fitotóxico;
- 30–60%: fitotóxico;
- < 30%: altamente fitotóxico.

3.4.8 Biometria e biomassa das plantas

A metodologia foi aplicada exclusivamente no experimento conduzido em vasos, aos 30 e 60 dias após a semeadura. Foram determinadas as seguintes características:

- Altura da planta – obtida por meio da medida da distância entre o coleto da planta e o ápice da haste principal;
- Comprimento da raiz – determinado com auxílio de paquímetro digital;
- Número de folhas trifoliadas, de flores e de nódulos radiculares – obtido pela contagem simples dessas estruturas;
- Massa fresca (MF) das folhas, raízes e vagens, cada parte foi pesada imediatamente após a coleta, em balança de precisão;
- Massa seca (MS), as mesmas partes supracitadas foram acondicionadas em sacos de papel e levadas à estufa a 65 ± 2 °C até atingirem massa constante.

3.4.9 Respostas fisiológicas

3.4.9.1 Fluorescência da clorofila

A fluorescência da clorofila foi avaliada somente no experimento em vasos, usando um fluorômetro portátil (OS-30p+, Opti-Sciences). A avaliação incluiu os parâmetros de fluorescência mínima (F_0), máxima (F_m), variável (F_v) e o rendimento quântico máximo de fotoquímica do PSII (F_v/F_m). Durante as medições, foi aplicado um pulso de luz de saturação com intensidade de $7.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e duração de 0,7 segundos, as folhas foram adaptadas ao escuro utilizando as pinças/clipes por 20 min (Azevedo Neto et al, 2011).

3.4.9.2 Conteúdo relativo de água (CRA) e extravasamento de eletrólitos (EL)

O conteúdo relativo de água (CRA) foi determinado no experimento em vasos, utilizando-se dez discos foliares com 1 cm de diâmetro. Inicialmente, os discos foram pesados para obtenção da massa fresca (MF). Em seguida, foram imersos em frascos contendo água deionizada, por 24 h a 20 °C, em ambiente escuro. Após esse período, os discos foram novamente pesados, obtendo-se a massa túrgida (MT). Posteriormente, foram secos em estufa com ventilação forçada a 65 °C por 48 h e, então, pesados para obtenção da massa seca (MS).

O CRA foi calculado pela fórmula: $CRA = (MF - MS) / (MT - MS)$, sendo o resultado expresso em porcentagem (%), conforme Slavick (1979).

O extravasamento de eletrólitos (EL) foi determinado também a partir de dez discos foliares de 1 cm de diâmetro, acondicionados em tubos de ensaio contendo 10 mL de água deionizada, mantidos por 24 h a 25 °C em banho-maria. Após esse período, foi realizada a leitura da condutividade elétrica da solução (L1). Em seguida, os tubos foram incubados a 90 °C por 1 h e, após atingirem o equilíbrio térmico com o ambiente, realizou-se nova leitura da condutividade elétrica (L2). O EL foi calculado com a fórmula: $EL (\%) = (L1 / L2) \times 100$, conforme Lutts et al. (1996). Ambas as avaliações da condição hídrica foram realizadas na folha +1.

3.4.10 Preparação do tecido vegetal para análise por ressonância magnética nuclear de hidrogênio

Aos 9 dias após a semeadura nas caixas Gerbox e aos 60 dias após a semeadura nos vasos, o solo foi cuidadosamente separado das plântulas e das plantas, respectivamente. As plântulas inteiras (9 dias) e as folhas (60 dias) foram secas em estufa de ventilação forçada a 40 °C por 48 horas (Harbourne et al., 2009). Em seguida, foi preparada uma amostra representativa de cada tratamento, a partir da combinação do material vegetal coletado correspondente. As amostras secas foram moídas em moinho e armazenadas em freezer até a realização das análises por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de 1H).

3.4.11 Análise metabolômica por ressonância magnética nuclear de hidrogênio (RMN de 1H)

A metodologia foi aplicada nas plântulas, aos 9 dias após a semeadura, e nas plantas cultivadas em vasos, aos 60 dias. Para a obtenção dos extratos, utilizou-se a metodologia descrita por Kim et al. (2012). Um total de 50 mg do material vegetal seco foi submetido à extração com uma mistura de 0,75 mL de solução tampão de KH_2PO_4 em D_2O (pH 6,0), contendo 0,01% (m/v) de TSP- d_4 , e 0,75 mL de metanol- d_4 . Após a adição dos solventes, as amostras foram

agitadas em vortex por 1 minuto, colocadas em banho de ultrassom por 20 minutos e, em seguida, centrifugadas a 17.000 rpm. Um volume de 800 µL do sobrenadante foi transferido para tubos de RMN com diâmetro de 5 mm.

Os dados foram obtidos em espectrômetro de RMN (Avance Neo 600 MHz, Fällanden, Switzerland). Os espectros de RMN de ^1H foram adquiridos a 300 K, com janela espectral de 12 ppm, número de pontos de aquisição de 64k, pré-saturação do sinal de HDO, 128 promediações, tempo de aquisição (AQ) de 2,6 s e tempo de recuperação (d1) de 5 s.

Todos os espectros foram obtidos utilizando-se a sequência de pulsos zgcprr e calibrados pelo sinal do TSP- d_4 em 0,00 ppm. As fases e as linhas de base foram corrigidos automaticamente utilizando o software Chenomx NMR Suite 10.0 (Chenomx Inc., Edmonton, Canada). Neste mesmo programa foram realizadas as identificações putativas dos compostos, por comparação com espectros de substâncias puras do banco de dados. A área do sinal do TSP- d_4 foi utilizada como referência para a quantificação dos metabólitos.

3.4.12 Análise estatística e quimiométrica dos dados

Os dados obtidos nos experimentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com posterior comparação das médias pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As análises estatísticas convencionais foram realizadas utilizando o software AgroEstat (Barbosa e Maldonado, 2015).

Para as variáveis GR, CRR, IG e BS, os dados foram submetidos à ANOVA, com agrupamento das médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) no software SISVAR® (UFLA, Lavras, Brasil).

Com relação aos perfis metabólicos, após a identificação e quantificação dos metabólitos, as concentrações foram submetidas à Análise de Componentes Principais (PCA) e à Análise de Agrupamento Hierárquico (AHC), acompanhadas de mapa de calor. Os dados foram previamente normalizados, e a distância euclidiana foi utilizada como métrica de similaridade. A ANOVA unidirecional, seguida do teste post hoc Tukey HSD ($p < 0,05$), foi aplicada para verificar diferenças estatísticas entre os grupos. Essas análises quimiométricas

foram conduzidas por meio da plataforma online MetaboAnalyst 6.0 (Xia e Wishart, 2011; Pang et al., 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização inicial dos materiais

4.1.1 Descrição do composto

Tabela 1. Composição média do composto obtido da mistura de componentes orgânicos e minerais, contendo esterco bovino, fosfato mineral e inoculantes biológicos (Mix de microrganismos).

Determinação	Unidade	Resultados	Metodologia
Nitrogênio - N *	g.kg ⁻¹	8,5	MAPA, Cap. III - E.1.1. Método Macrométodo da liga de Raney
Fósforo - P ₂ O ₅ *	g.kg ⁻¹	13,6	MAPA, Cap. III - E.2.4.2. Espectrofotométrico do ácido molibdovanadofosfórico
Potássio - K ₂ O *	g.kg ⁻¹	10,3	MAPA, Cap. III - E.6.2.2. Fotometria de chama
Cálcio - CaO *	g.kg ⁻¹	11,8	MAPA, Cap. III - E.7 Método espectrométrico por absorção atômica
Magnésio - MgO *	g.kg ⁻¹	7,1	MAPA, Cap. III - E.7 Método espectrométrico por absorção atômica
Enxofre - S *	g.kg ⁻¹	5,1	MAPA, Cap. III - E.8 Método gravimétrico do sulfato de bário
Matéria Orgânica	g.kg ⁻¹	174,1	MAPA, Cap. III - D.1 Determinação da umidade a 65°C
Carbono Orgânico	g.kg ⁻¹	75,2	MAPA, Cap. III - E.13 Método volumétrico do dicromato de potássio
Relação C/N	-	8,8	MAPA, Cap. III - G Cálculo da Relação C/N
Nitrogênio - N **	g.kg ⁻¹	1,0	MAPA, Cap. III - E.1.1. Método Macrométodo da liga de Raney
Fósforo - P ₂ O ₅ **	g.kg ⁻¹	1,3	MAPA, Cap. III - E.2.4.2. Espectrofotométrico do ácido molibdovanadofosfórico
Potássio - K ₂ O **	g.kg ⁻¹	1,7	MAPA, Cap. III - E.6.2.2. Fotometria de chama
Cálcio - CaO **	g.kg ⁻¹	1,1	MAPA, Cap. III - E.7 Método espectrométrico por absorção atômica
Magnésio - MgO **	g.kg ⁻¹	0,9	MAPA, Cap. III - E.7 Método espectrométrico por absorção atômica
Enxofre - S **	g.kg ⁻¹	0,7	MAPA, Cap. III - E.8 Método gravimétrico do sulfato de bário
Carbono Orgânico **	g.kg ⁻¹	7,5	MAPA, Cap. III - E.13 Método volumétrico do dicromato de potássio

O composto utilizado (Tabela 1), apresentou composição nutricional com elevados teores de nitrogênio (8,5 g/kg), fósforo (13,6 g/kg) e matéria orgânica

(174,1 g/kg), além de relação C/N de 8,8, indicando adequado grau de maturação e estabilidade do material. A adição de fosfato mineral contribuiu de forma significativa para o enriquecimento do composto com fósforo assimilável, ampliando seu potencial de uso em solos com baixa disponibilidade deste nutriente. Os teores de cálcio, magnésio e enxofre também foram expressivos, conferindo ao composto propriedades agronomicamente desejáveis para aplicação em culturas exigentes como a soja (Kumari et al., 2025).

4.1.2 Composição química do solo usado no experimento

Tabela 2. Valores médios das características químicas do solo utilizado no experimento.

Símbolo	Metodologia	Elemento	Unidade	Resultado
pH	Água	Potencial Hidrogeniônico		5,6
P	Mehlich-1	Fósforo	mg/dm ³	11,02
K	Mehlich-1	Potássio	mmol/dm ³	2,12
Ca	KCl	Cálcio	mmol/dm ³	11,93
Mg	KCl	Magnésio	mmol/dm ³	5,19
Al	KCl	Alumínio	mmol/dm ³	-0,40
Al + H	Acetato de Cálcio	Acidez Potencial	mmol/dm ³	27,00
SB	-	Soma de Base	mmol/dm ³	19,23
t	-	CTC efetiva	mmol/dm ³	18,83
T	-	CTC pH 7,0	mmol/dm ³	46,23
V	-	Percentual de Saturação de Base	%	41,60
m	-	Saturação de Alumínio	%	2,12
Zn	Mehlich-1	Zinco	mg/dm ³	1,00
Cu	Mehlich-1	Cobre	mg/dm ³	0,98
Fe	Mehlich-1	Ferro	mg/dm ³	15,39
Mn	Mehlich-1	Manganês	mg/dm ³	2,40
B	Água quente	Boro	mg/dm ³	N/S
S	Carvão ativado	Enxofre	mg/dm ³	N/S
M.O	Dicromato de Sódio	Matéria Orgânica	Dag/Kg	5,69
Argila	NaOH 1,0 mol	Argila	%	N/S
Areia	NaOH 1,0 mol	Areia	%	N/S
Silte	NaOH 1,0 mol	Silte	%	N/S

A composição química do solo usado no experimento (Tabela 2), evidenciou pH levemente ácido (5,6), baixos teores de fósforo (11,02 mg/dm³) e potássio (2,12 mmol/dm³), além de saturação por bases moderada (41,6%), refletindo condições típicas de solos tropicais com baixa fertilidade natural, a matéria orgânica apresentou valores moderados de (5,69 dag/kg) (Oliveira et al., 2021).

Esses resultados indicam que, embora o teor de matéria orgânica seja moderado, a baixa disponibilidade de fósforo e potássio, associada à saturação por bases moderada, reforça a necessidade de adoção de práticas que incrementem a fertilidade do solo. A adição de matéria orgânica, além de fornecer nutrientes essenciais, pode contribuir para o aumento da capacidade de troca catiônica, a melhoria da estrutura física e o estímulo à atividade microbiana, criando condições mais favoráveis ao desenvolvimento da cultura da soja, configurando-se como estratégia promissora para a regeneração de solos tropicais de baixa fertilidade (Pérez-Llorca et al., 2025).

4.2 Parâmetros microbiológicos e bioquímicos do solo

Os parâmetros microbiológicos e bioquímicos avaliados permitem inferir os efeitos do composto orgânico sobre a atividade e eficiência da microbiota do solo nos diferentes sistemas experimentais. A seguir, são apresentados os resultados obtidos no sistema de microcosmos (15 dias) e no sistema de vasos aos 30 e 60 dias após a semeadura.

4.2.1 Carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio(N)

Os efeitos da aplicação do composto foram evidentes já nos primeiros 15 dias de incubação em sistema de microcosmos. Como demonstrado na (Tabela 3), a compostagem influenciou de maneira significativa nos níveis de carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio (N) no solo, com tendência positiva proporcional ao aumento das doses aplicadas. Esses resultados demonstram a efetividade do composto em melhorar rapidamente os atributos químicos do solo, criando condições mais favoráveis à atividade microbiana e ao desenvolvimento inicial das plantas (Wang et al., 2025).

Tabela 3. Efeitos dos tratamentos sobre o carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio (N) no solo em sistema de microcosmos. Dados obtidos 15 dias após a aplicação diferentes concentrações de composto em porcentagem de massa (% m/m): controle (0), composto 1%, 3% e 5 %.

Tratamentos	COT	MO	N
	g. Kg ⁻¹ de SS		
Controle	29,538c	50,924c	1,476c
1% m/m	39,647bc	68,351bc	1,982bc
3% m/m	50,88b	87,717b	2,544b
5% m/m	79,89a	137,732a	3,994a
DMS (5%)	14,833	25,573	0,741

No sistema de microcosmos (Tabela 3), a aplicação da dose de 1% m/m resultou em aumentos de aproximadamente 34% nos teores de COT, MO e N, em relação ao controle. De forma semelhante, a dose de 3% m/m elevou esses mesmos parâmetros em cerca de 72%. Já a aplicação de 5% m/m promoveu incrementos próximos a 170% para todos os três indicadores, quando comparados ao controle.

No sistema de vasos, a aplicação do composto orgânico resultou em incrementos expressivos nos teores de carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e nitrogênio total (N) do solo, tanto aos 30 dias (Tabela 4) quanto aos 60 dias (Tabela 5), após o plantio da soja.

Tabela 4. Efeitos dos tratamentos sobre a carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio (N) no solo em sistema de vasos, 30 dias após o plantio de *Glycine max* L. com diferentes adubações de composto em porcentagem de massa (% m/m): controle (0), composto 1%, 3% e 5% e adubação química.

Tratamentos	COT	MO	N
	g. Kg ⁻¹ de SS		
Controle	17,438c	30,064c	0,871c
1% m/m	79,851b	137,663b	3,992b
3% m/m	95,760b	165,090b	4,788b
5% m/m	174,183a	300,292a	8,709a
Adubação química	34,877c	60,128c	1,743c
DMS (5%)	18,1773	31,3377	0,9089

Aos 30 dias (Tabela 4), os aumentos foram proporcionais à dose aplicada: na dose de 1% m/m, os valores de COT, MO e N foram cerca de 358% superiores

aos do controle; na dose de 3% m/m, os incrementos alcançaram aproximadamente 449%; e na dose de 5% m/m, os teores atingiram valores aproximadamente dez vezes maiores que os do controle ($\approx 899\%$).

Tabela 5. Efeitos dos tratamentos sobre a carbono orgânico total (COT), matéria orgânica (MO) e teor de nitrogênio (N) no solo em sistema de vasos, 60 dias após o plantio de *Glycine max* L. com diferentes adubações de composto em porcentagem de massa (% m/m): controle (0), composto 1%, 3% e 5% e adubação química.

Tratamentos	COT	MO	N
	g. Kg ⁻¹ de SS		
Controle	7,94b	13,70b	0,68b
1% m/m	5,57b	9,61b	0,48b
3% m/m	7,89b	13,61b	0,68b
5% m/m	14,22a	24,52a	1,22a
Adubação química	6,19b	10,68b	0,53b
DMS (5%)	5,44	9,39	0,46

Aos 60 dias (Tabela 5), observou-se redução geral nos teores em relação aos valores registrados aos 30 dias, especialmente nas doses mais baixas, possivelmente em função da mineralização e do consumo dos nutrientes pelas plantas ao longo do ciclo. Na dose de 1% m/m, os teores de COT, MO e N foram cerca de 29,8% inferiores aos do controle; na dose de 3% m/m, mantiveram-se próximos ao controle (variação inferior a 1%); e na dose de 5% m/m, ainda se verificaram incrementos substanciais, da ordem de 79%, evidenciando efeito residual positivo do composto sobre a qualidade química do solo.

Os resultados obtidos neste estudo, com aumentos expressivos nos teores de COT, MO e N do solo, estão alinhados com os achados de Denoncourt et al. (2025). Esses autores, em uma meta-análise abrangendo diferentes condições edafoclimáticas e sistemas agrícolas, observaram que a aplicação de esterco promove consistentemente o acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, sendo o efeito proporcional à dose aplicada. A análise englobou dados provenientes de diversas regiões do mundo, evidenciando que esse padrão de resposta não se restringe a condições locais, mas é recorrente em múltiplos contextos agroecológicos.

A expressiva elevação nos teores de COT, MO e N observada neste trabalho, especialmente nas doses mais elevadas de composto, também está em consonância com a literatura que aponta o carbono orgânico do solo como um dos principais determinantes da mineralização do nitrogênio. Chiriac et al. (2025) verificaram que o teor de carbono orgânico, aliado à relação C/N e às condições hídricas, explica até 19% da variação na quantidade de N mineralizado, percentual que pode alcançar 52% quando outros fatores edáficos são considerados. Esses resultados indicam que os efeitos positivos observados no presente estudo podem persistir e ser modulados pela dinâmica do solo em médio e longo prazos.

A importância da matéria orgânica vai além do simples fornecimento de carbono para os microrganismos. Xin (2024) ressalta que a MOS exerce papel central na melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, promovendo benefícios como o aumento da capacidade de troca catiônica, melhoria da estrutura e da retenção de água, além de favorecer a formação de agregados estáveis. Dessa forma, os incrementos observados nos tratamentos com compostagem, especialmente na dose mais elevada, podem estar relacionados à melhora nas condições do ambiente edáfico, favorecendo o acúmulo e a retenção de nutrientes como o nitrogênio.

A superioridade dos tratamentos com maiores concentrações de composto orgânico em relação à adubação química na retenção de N também pode ser explicada pelas características dos fertilizantes orgânicos, que apresentam liberação lenta e contínua de nutrientes. Como enfatizado por Pérez-Llorca et al. (2025), o esterco bovino é rico em diversos nutrientes essenciais, incluindo o N, que está presente na composição do composto utilizado neste experimento em uma concentração de 8,5 g/kg (Tabela 1). Essa composição garante um suprimento mais constante ao longo do tempo, contribuindo para o efeito residual positivo observado. Além disso, os compostos orgânicos oferecem menor risco de perda por lixiviação ou erosão, conforme destacado na literatura, ao contrário dos fertilizantes inorgânicos que, devido à sua alta solubilidade, podem resultar em perdas consideráveis sob condições de umidade elevada (Kostensalo et al., 2024).

4.2.2 Carbono da biomassa microbiana (CBM), atividade respiratória (AR), quociente metabólico (qCO₂), quociente microbiano (qMic), atividade enzimática da desidrogenase (AD)

A avaliação dos atributos microbiológicos do solo foi realizada nos sistemas de microcosmos (Tabela 6) e de vasos aos 30 e 60 dias após o plantio (Tabelas 7 e 8, respectivamente), permitindo analisar de forma integrada o efeito das diferentes doses do composto orgânico sobre a atividade e eficiência da microbiota. Os parâmetros carbono da biomassa microbiana (CBM), atividade respiratória (AR), quociente metabólico (qCO₂), quociente microbiano (qMic) e atividade enzimática da desidrogenase (AD) foram utilizados por representarem indicadores sensíveis das alterações na dinâmica biológica do solo (Kumari et al., 2024).

Tabela 6. Interação biológica no sistema composto-solo em microcosmos. Teores de carbono da biomassa microbiana (CBM), atividade respiratória (AR), quociente metabólico (qCO₂), quociente microbiano (qMic), atividade enzimática da desidrogenase (AD) no solo sob diferentes concentrações de composto em porcentagem de massa (m/m): controle (0), composto: 1%, 3% e 5%.

Tratamentos	Carbono da biomassa microbiana (CBM) µg g ⁻¹ de C no solo	Atividade respiratória mg CO ₂ /100g SS	Quociente metabólico (qCO ₂) mg C-CO ₂ kg ⁻¹ CO ₂ dia ⁻¹	Quociente microbiano (qMic) %	Atividade enzimática da desidrogenase (AD) µg TFF/g SS/24h
Controle	17,33ab	6,61d	0,40a	0,60ab	4,72c
1% m/m	60,22a	20,65c	0,38a	1,75a	7,22c
3% m/m	22,79ab	41,13b	3,91a	0,62ab	14,25b
5% m/m	4,22b	51,93a	14,55a	0,05b	26,84a
DMS (5%)	49,128	5,899	19,389	1,552	6,309

No sistema de microcosmos, a adição do composto orgânico promoveu respostas diferenciadas nos atributos microbiológicos do solo (Tabela 6). O carbono da biomassa microbiana (CBM) apresentou valores mais elevados na dose de 1% m/m (60,22 µg g⁻¹ C), diferindo significativamente apenas da dose de 5% m/m (4,22 µg g⁻¹ C), que resultou na menor atividade microbiana. A atividade respiratória (AR) aumentou progressivamente com as doses do

composto, sendo todas as aplicações estatisticamente superiores ao controle, com destaque para a dose de 5% m/m (51,93 mg CO₂ 100 g⁻¹ SS). O quociente metabólico (qCO₂) não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, enquanto o quociente microbiano (qMic) foi maior na dose de 1% m/m (1,75%), diferenciando-se apenas da dose de 5% m/m (0,05%), a qual reduziu expressivamente esse parâmetro. A atividade enzimática da desidrogenase (AD) apresentou incremento significativo apenas a partir da dose de 3% m/m (14,25 µg TFF g⁻¹ SS 24h⁻¹), atingindo o valor máximo na dose de 5% m/m (26,84 µg TFF g⁻¹ SS 24h⁻¹), enquanto a dose de 1% m/m não diferiu estatisticamente do controle.

Esses resultados evidenciam que doses moderadas do composto tendem a favorecer o equilíbrio microbiano, enquanto doses mais elevadas intensificam a atividade enzimática e respiratória, possivelmente refletindo maior demanda energética da microbiota para decomposição da matéria orgânica. Essa interpretação é consistente com as conclusões de Omokaro et al. (2025), que observaram que aplicações mais altas de composto, embora aumentem a disponibilidade de carbono, induzem maior esforço metabólico da microbiota para processar o excedente de substrato, podendo alterar a eficiência do uso dos recursos microbianos e modificar as rotas de ciclagem de nutrientes.

Tabela 7. Interação biológica no sistema composto-solo-plantas na condição de vasos aos 30 dias após o plantio. Teores de carbono da biomassa microbiana (CBM), atividade respiratória (AR), quociente metabólico (qCO₂), quociente microbiano (qMic), atividade enzimática da desidrogenase (AD) no solo sob diferentes concentrações de composto em porcentagem de massa (m/m): controle (0), composto: 1%, 3% e 5% e adubação química.

Tratamentos	Carbono da biomassa microbiana (CBM) µg g ⁻¹ de C no solo	Atividade respiratória mg CO ₂ /100g SS	Quociente metabólico (qCO ₂) mg C-CO ₂ kg ⁻¹ CO ₂ dia ⁻¹	Quociente microbiano (qMic) %	Atividade enzimática da desidrogenase (AD) µg TFF/g SS/24h
Controle	28,203a	0,786b	0,029b	1,607a	9,457c
1% m/m	43,590a	2,387ab	0,091b	0,534b	61,632b
3% m/m	19,760a	4,741ab	0,270ab	0,211b	86,270ab
5% m/m	10,610a	5,788a	0,526a	0,060b	125,839a
Adubação química	28,016a	4,215ab	0,158b	0,797b	11,816c
DMS (5%)	36,663	4,0014	0,2818	0,7852	48,1864

No experimento conduzido em vasos, aos 30 dias após o plantio (Tabela 7), não foram observadas diferenças significativas nos valores de carbono da biomassa microbiana (CBM), que variaram de 10,61 a 43,59 $\mu\text{g g}^{-1} \text{C}$. A atividade respiratória (AR) foi mais elevada na dose de 5% m/m (5,788 mg CO_2 100 g^{-1} SS), diferindo apenas do controle (0,786 mg CO_2 100 g^{-1} SS), enquanto as doses de 1% (2,39 mg CO_2 100 g^{-1} SS), 3% (4,74 mg CO_2 100 g^{-1} SS) e a adubação química (4,215 mg CO_2 100 g^{-1} SS) apresentaram valores intermediários, sem diferenças significativas entre si. O quociente metabólico (qCO_2) foi maior na dose de 5% m/m (0,526 mg $\text{C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), diferindo do controle (0,029 mg $\text{C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e da dose de 1% (0,091 mg $\text{C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), mas não diferindo da dose de 3% (0,270 mg $\text{C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). O quociente microbiano (qMic) apresentou maior valor no controle (1,607%), significativamente superior aos demais tratamentos (0,06–0,797%), que não diferiram entre si. A atividade enzimática da desidrogenase (AD) aumentou com a aplicação do composto, atingindo 125,84 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$ na dose de 5%, superior ao controle (9,46 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$) e à adubação química (11,816 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$).

Tabela 8. Interação biológica no sistema composto-solo-planta na condição de vasos aos 60 dias após o plantio. Teores de carbono da biomassa microbiana (CBM), atividade respiratória (AR), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano (qMic), atividade enzimática da desidrogenase (AD) no solo sob diferentes concentrações de composto em porcentagem de massa (m/m): controle (0), composto: 1%, 3% e 5% e adubação química.

Tratamentos	Carbono da biomassa microbiana (CBM) $\mu\text{g g}^{-1}$ de C no solo	Atividade respiratória mg $\text{CO}_2/100\text{g SS}$	Quociente metabólico (qCO_2) mg $\text{C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ CO}_2 \text{ dia}^{-1}$	Quociente microbiano (qMic) %	Atividade enzimática da desidrogenase (AD) $\mu\text{g TFF/g SS/24h}$
Controle	68,19a	0,245a	0,003a	9,13a	7,67cd
1% m/m	40,51b	0,543a	0,012a	7,43ab	10,23c
3% m/m	11,92c	0,304a	0,025a	1,78b	20,64b
5% m/m	29,36bc	0,407a	0,024a	2,05b	34,66a
Adubação química	67,32a	0,550a	0,008a	11,54a	4,09d
DMS (5%)	22,79	1,16	0,04	6,74	5,66

No cultivo em vasos, 60 dias após o plantio (Tabela 8), o carbono da biomassa microbiana (CBM) foi mais elevado nos tratamentos controle (68,19 $\mu\text{g g}^{-1}$) e adubação química (67,32 $\mu\text{g g}^{-1}$), que não diferiram entre si. A dose de 1% m/m apresentou valor intermediário (40,51 $\mu\text{g g}^{-1}$), enquanto as doses de 3% (11,92 $\mu\text{g g}^{-1}$) e 5% m/m (29,36 $\mu\text{g g}^{-1}$) exibiram os menores valores, sem diferença estatística entre si.

A atividade respiratória (AR) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, indicando comportamento semelhante da microbiota do solo para essa variável.

O quociente metabólico (qCO_2) também não diferiu estatisticamente entre os tratamentos, sugerindo que o nível de estresse metabólico microbiano se manteve semelhante nas diferentes condições de adubação.

O quociente microbiano (qMic) apresentou maiores valores no controle (9,13%) e na adubação química (11,54%), que não diferiram entre si, enquanto as doses de 3% (1,78%) e 5% m/m (2,05%) mostraram menores proporções de biomassa ativa. A dose de 1% m/m apresentou valor intermediário (7,43%), não diferindo do controle.

Para a atividade enzimática da desidrogenase (AD), a maior atividade foi registrada na dose de 5% m/m (34,66 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$), seguida por 3% m/m (20,64 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$), ambas significativamente superiores às demais. A dose de 1% m/m (10,23 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$) apresentou valor intermediário, enquanto o controle (7,67 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$) e a adubação química (4,09 $\mu\text{g TFF g}^{-1} \text{ SS } 24\text{h}^{-1}$) tiveram as menores atividades, sem diferença estatística entre si.

Ao avaliar a influência do esterco bovino sobre as propriedades biológicas e bioquímicas do solo em um sistema agrícola de longo prazo, Kumar et al. (2021) constataram que as doses mais elevadas promoveram incremento superior a 100% na atividade enzimática da desidrogenase, além de aumentos expressivos no carbono da biomassa microbiana (CBM), na respiração basal e no quociente microbiano (qMic). Esses resultados reforçam que a adição de matéria orgânica estimula a microbiota do solo e acelera os processos de ciclagem de nutrientes. A consistência dos dados indica que a aplicação de composto contribui não apenas para a fertilidade química, mas também para a

melhoria da qualidade biológica do solo, ampliando sua funcionalidade e estabilidade em médio prazo.

Os resultados obtidos aos 30 e 60 dias evidenciam que o efeito do composto sobre a microbiota do solo é dinâmico e dependente do tempo de incubação. Na fase inicial (30 dias), observou-se um aumento expressivo na atividade microbiana, especialmente na dose de 5% m/m, refletido por maiores valores de respiração basal, atividade enzimática da desidrogenase (AD) e quociente metabólico (qCO_2), indicando intensa mineralização da matéria orgânica.

Entretanto, o quociente microbiano ($qMic$) manteve-se mais elevado no controle, sugerindo que a proporção de biomassa microbiana ativa é maior em solos sem insumos, embora com menor atividade total. Adicionalmente, valores elevados de qCO_2 sugerem que a população microbiana está utilizando o carbono de suas próprias células para respiração de manutenção, evidenciando uma condição de estresse ou adversidade no ambiente do solo (Xu et al., 2021).

Aos 60 dias, alguns efeitos se atenuaram ou se reorganizaram, mostrando que a adição do composto provoca um pulso inicial de estímulo microbiano, seguido por ajustes na comunidade ao longo do tempo. Esse comportamento é coerente com os achados de Kong et al. (2025), que destacam que o enriquecimento com matéria orgânica promove mudanças temporais na composição e na eficiência metabólica dos microrganismos, modulando a ciclagem de carbono e nitrogênio no solo.

4.3 Fitotoxicidade e germinação

Embora os testes de fitotoxicidade não constarem na Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020) nem na Instrução Normativa nº 25/2009 do MAPA (BRASIL, 2009), sua aplicação tem se consolidado como ferramenta sensível e eficiente para a avaliação da qualidade e estabilidade de resíduos orgânicos durante o processo de compostagem.

A avaliação da germinação de sementes de *Glycine max* L. aos 9 dias, em caixas Gerbox (Tabela 9) constitui indicativo sensível tanto do grau de maturação do composto quanto da eventual presença de compostos fitotóxicos

residuais, e garante a segurança agrônômica do material antes de sua aplicação em sistemas produtivos.

Tabela 9. Avaliação da fitotoxicidade e maturação do composto na germinação de sementes de *Glycine max* L. em caixas Gerbox com aplicação de composto em porcentagem de massa (% m/m): controle (0), composto 1%, 3% e 5%. Número de sementes germinadas, comprimento médio das radículas, germinação relativa (GR), crescimento médio relativo da radícula (CRR) e índice de germinação (IG).

Tratamentos	Taxa de Germinação (%)	Comprimento das radículas (cm)	GR	CRR	IG
Controle	23,33a	13,37a			
1% m/m	24,00a	13,12a	103,26a	99,52a	104,16a
3% m/m	23,66a	14,96a	101,51a	113,26a	115,30a
5% m/m	22,00a	14,50a	94,79a	110,07a	106,34a
DMS (5%)	3,61	4,41	23,70	57,73	80,69

Os resultados mostraram que não houve diferenças estatísticas significativas ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos para nenhum dos parâmetros avaliados (taxa de germinação, comprimento médio das radículas, germinação relativa, crescimento relativo da radícula e índice de germinação). Isso indica que a aplicação do composto orgânico, mesmo nas doses mais elevadas (5% m/m), não causou fitotoxicidade às sementes de soja e não comprometeu o desenvolvimento inicial das plântulas. Pelo contrário, pequenas variações observadas — como germinação relativa de até 103% na dose de 1% m/m e índice de germinação de até 115% na dose de 3% m/m — sugerem tendência de efeito neutro ou ligeiramente positivo, mas sem significância estatística.

Resultados semelhantes foram relatados por Kong et al. (2022), que verificaram que compostos orgânicos devidamente estabilizados não afetam adversamente a emergência das sementes nem o vigor inicial das plântulas, confirmando que a compostagem bem conduzida tende a oferecer condições seguras para o estabelecimento da cultura.

4.4 Biometria e biomassa das plantas

4.4.1 Comprimento da raiz, altura, número de nódulos, número de flores e número de trifólios

Ao examinar os parâmetros biométricos das plantas no ensaio em vasos, 30 dias após o plantio (Tabela 10), verificou-se que não foram observadas diferenças significativas no comprimento das raízes entre os tratamentos, indicando desempenho semelhante para esse parâmetro.

Para a altura das plantas, todos os tratamentos com composto (1%, 3% e 5% m/m) e a adubação química apresentaram valores estatisticamente superiores ao controle, com incrementos variando de aproximadamente 13% a 24%.

Quanto ao número de nódulos, apenas a dose de 1% m/m apresentou diferença significativa em relação ao controle, registrando um aumento de cerca de 471%.

No número de flores, o tratamento com 3% m/m se destacou como o único superior ao controle, com incremento aproximado de 55%.

Já para o número de trifólios, todos os tratamentos adubados (1%, 3%, 5% m/m e adubação química) apresentaram valores significativamente superior ao controle, com aumentos na faixa de 90% a 124%, sem diferenças estatísticas entre si.

Tabela 10. Análises de biometria das plantas de soja no experimento conduzido em vasos, 30 dias após o plantio de *Glycine max* L. com diferentes adubações em porcentagem de massa (% m/m): controle, composto: 1%, 3% e 5% e adubação química.

	Raiz (cm)	Altura (cm)	nº nódulos	nº flores	Nº de trifólios
Controle	52,87a	23,75b	4,25b	0,00c	5,25b
1% m/m	60,12a	34,62a	24,25a	5,50ab	11,75a
3% m/m	69,12a	37,50a	13,25ab	8,50a	10,00a
5% m/m	76,50a	34,00a	6,75b	5,00ab	11,50a
Adubação química	69,75a	34,37a	7,50ab	4,50b	10,50a
DMS (5%)	40,63	7,86	17,21	3,94	3,35

Aos 60 dias após o plantio (Tabela 11), a altura das plantas não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos,

indicando que a aplicação do composto orgânico e da adubação química não influenciou esse parâmetro.

Para o comprimento radicular, apenas o tratamento com adubação química apresentou diferença significativa, com incremento aproximado de 25,6% em relação ao controle.

No número de nódulos, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, mostrando que a adição do composto, mesmo em maiores doses, não afetou a nodulação da soja nesse período.

O número de flores também não variou significativamente entre os tratamentos, sugerindo ausência de efeito direto das adubações sobre o florescimento inicial.

Quanto ao número de trifólios, não houve diferenças estatísticas, indicando que esse parâmetro não respondeu às diferentes fontes e doses de adubação.

Por fim, no número de vagens por planta, o tratamento com 5% m/m de composto orgânico apresentou desempenho significativamente superior, com aumento de aproximadamente 58,3% em relação ao controle.

Tabela 11. Análises de biometria das plantas no experimento conduzido em vasos, 60 dias após o plantio de *Glycine max* L. com diferentes adubações em porcentagem de massa (% m/m): controle, composto: 1%, 3% e 5% e adubação química.

	Raiz (cm)	Altura (cm)	Nº de nódulos	Nº de flores	Nº de trifólios	Vagens
Controle	65,75a	45,75b	109,00a	18,25a	38,25bc	34,25c
1% m/m	68,50a	49,62ab	57,00b	8,75b	43,75ab	47,50abc
3% m/m	63,50a	52,12ab	61,33b	10,25ab	54,50a	50,75ab
5% m/m	76,50a	53,00a	23,00bc	4,50b	27,00cd	54,25a
Adubação química	82,62a	54,00a	11,00c	2,00b	12,50d	38,00bc
DMS (5%)	31,45	6,64	41,14	8,9363	16,1588	13,75

Os resultados de biometria das plantas de soja evidenciaram variações significativas em função das doses de composto orgânico, com efeitos distintos ao longo do ciclo. Aos 30 dias após a semeadura, observou-se incremento no número de nódulos e trifólios em doses intermediárias, enquanto aos 60 dias as doses mais elevadas favoreceram o número de vagens. Esses resultados estão em concordância com os achados de Arslanoglu (2022), que verificou melhora

no desenvolvimento vegetativo da soja com o uso de fertilizantes orgânicos, especialmente no aumento da área foliar e vigor radicular.

Estudos semelhantes corroboram esses achados, como o de Rizwan et al. (2021), que avaliaram o efeito de diferentes fertilizantes orgânicos sobre variedades de soja e observaram incremento no crescimento das plantas, evidenciado por maior altura e maior desenvolvimento vegetativo em tratamentos com adubação orgânica. Esses autores destacaram que a adição de matéria orgânica melhora a disponibilidade de nutrientes e as condições do solo, favorecendo processos fisiológicos essenciais ao desenvolvimento inicial da cultura. A convergência entre esses resultados e os observados no presente estudo sugere que o fornecimento equilibrado de nutrientes via compostagem contribui para melhorar atributos morfológicos da soja, potencializando a formação de estruturas vegetativas e reprodutivas.

Além disso, Sandrakirana e Arifin (2021) observaram que o uso combinado ou exclusivo de adubação orgânica elevou parâmetros biométricos, como altura e número de folhas, quando comparado ao controle sem adubação, enquanto Lestari et al. (2024) relataram resposta positiva da cultura à aplicação de fontes orgânicas, resultando em melhor desempenho agrônômico e maior produção de vagens.

Tais evidências sustentam que a adição de composto orgânico contribui para o crescimento equilibrado da soja, promovendo ganhos consistentes em variáveis vegetativas e produtivas, principalmente quando comparada à ausência de adubação.

4.4.2 Biomassa das plantas

Na avaliação da biomassa das plantas de soja no sistema de vasos aos 30 dias após o plantio (Tabela 12), observaram-se variações significativas em alguns parâmetros em função das doses de composto orgânico. Para a massa fresca de folhas (MFF), o tratamento com 5% m/m apresentou o maior valor, promovendo incremento de aproximadamente 278% em relação ao controle. Os tratamentos com 3% m/m e adubação química também se destacaram, sem diferir estatisticamente do 5% m/m, enquanto a dose de 1% m/m não apresentou diferença significativa em relação ao controle.

Na massa fresca de raízes (MFR), os tratamentos com 1%, 3% e 5% m/m apresentaram valores significativamente superiores ao controle, com aumentos entre 230% e 252%, enquanto a adubação química não diferiu estatisticamente dos demais. Resultados semelhantes foram observados para a massa seca de raízes (MSR), na qual as doses de 1%, 3% e 5% m/m apresentaram incrementos entre 300% e 400% em relação ao controle.

Quanto à massa fresca total (MFT), todos os tratamentos adubados — 1%, 3%, 5% m/m e adubação química — superaram significativamente o controle, com ganhos variando de 161% a 266%. Para a massa seca de folhas (MSF) e massa seca total (MST), não foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos.

Tabela 12. Valores de biomassa das plantas no experimento conduzido em vasos, 30 dias após o plantio, de *Glycine max* L. com diferentes adubações em porcentagem de massa (% m/m): controle, composto: 1%, 3%, 5% e adubação química.

Tratamentos	Massa Fresca Folhas (MFF)	Massa Seca Folhas (MSF)	Massa Fresca Raiz (MFR)	Massa Seca Raiz (MSR)	Massa Fresca total (MFT)	Massa Seca Total (MST)
Gramas (g)						
Controle	2,740c	7,510a	1,595b	0,162b	4,335b	7,672a
1% m/m	6,002bc	7,412a	5,317a	0,647a	11,320a	8,060a
3% m/m	8,252ab	4,982a	5,620a	0,810a	13,872a	5,792a
5% m/m	10,370a	2,915a	5,505a	0,715a	15,875a	3,630a
Adubação química	7,930ab	5,125a	4,432ab	0,597ab	12,362a	5,722a
DMS (5%)	3,4768	4,8825	3,1458	0,4482	5,8837	4,7372

A análise da biomassa das plantas de soja aos 60 dias (Tabela 13) evidenciou que apenas alguns parâmetros apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos com composto orgânico. A massa seca das folhas (MSF) foi superior na dose de 3% m/m, alcançando 12,25 g, o que representa um aumento de aproximadamente 53,6% em relação ao controle (7,98 g). Para a biomassa das vagens, observaram-se ganhos expressivos nas doses mais elevadas de composto: a massa fresca (MFV) atingiu 20,71 g na dose de 5% m/m, incremento de cerca de 143,1% em relação ao controle (8,52 g); a massa seca (MSV) chegou a 5,08 g, aumento de aproximadamente 182,2% em relação ao controle (1,80 g); e a massa total das

vagens (MTV) alcançou 25,79 g na mesma dose, correspondendo a um acréscimo de 149,8% frente ao controle (10,33 g).

Tabela 13. Valores de biomassa das plantas no experimento conduzido em vasos, 60 dias após o plantio, de *Glycine max* L. com diferentes adubações em porcentagem de massa (% m/m): controle, composto: 1%, 3%, 5% e adubação química.

	Massa Fresca Folhas (MFF)	Massa Seca Folhas (MSF)	Massa fresca Raiz (MFR)	Massa Seca Raiz (MSR)	Massa Fresca total (MFT)	Massa seca total (MST)	Massa fresca vagens	Massa Seca vagens	Massa total Vagem
Controle	25,48a	7,98b	9,03a	3,22a	33,46a	12,26a	8,52c	1,80c	10,33c
1% m/m	30,08a	9,99ab	11,32a	4,46a	40,08a	15,78a	12,89bc	2,90bc	15,79bc
3% m/m	37,58a	12,25a	11,40a	4,19a	49,84a	15,60a	16,85ab	3,79ab	20,64ab
5% m/m	31,36a	10,65ab	10,36a	4,15a	42,02a	14,51a	20,71a	5,08a	25,79a
Adubação química	25,85a	9,62ab	7,27a	4,42a	35,47a	11,69a	14,03bc	3,70ab	17,73bc
DMS (5%)	12,50	4,15	8,61	3,15	16,60	11,21	6,33	1,47	7,80

Os resultados do presente estudo demonstraram que a aplicação de composto orgânico promoveu ganhos significativos na biomassa da soja, especialmente nas doses mais elevadas. Esses achados estão em consonância com Sandrakirana e Arifin (2021), que avaliaram o efeito de fertilizantes orgânicos e químicos no crescimento e produção da soja em condições de sequeiro e observaram aumentos expressivos no acúmulo de biomassa sob adubação orgânica. Os autores atribuíram esse desempenho à liberação gradual e contínua de nutrientes, que favorece maior disponibilidade de nitrogênio e carbono para a cultura ao longo do ciclo, resultando em plantas mais vigorosas e produtivas.

De modo semelhante, no presente estudo, a dose de 5% m/m de composto orgânico elevou significativamente a massa fresca e seca das vagens, além da massa total das vagens, com incrementos de até 182,2% em relação ao controle, evidenciando que a adição de matéria orgânica favorece não apenas o crescimento vegetativo, mas também a formação e enchimento de estruturas reprodutivas. A coerência entre os estudos reforça que a adubação orgânica, quando devidamente estabilizada, contribui para maior acúmulo de biomassa e potencial produtivo da soja, ampliando a sustentabilidade do manejo em

comparação com sistemas exclusivamente dependentes de fertilizantes químicos (Bebeley et al, 2024).

Os incrementos observados na biomassa podem ser explicados pela maior disponibilidade de nutrientes essenciais para o crescimento. Kou et al. (2025), esclarecem que a soja absorve diversos nutrientes fundamentais ao seu potencial produtivo, como os macronutrientes primários potássio (K) e fósforo (P), e os secundários magnésio (Mg) e enxofre (S).

O potássio contribui para maior produção de biomassa, melhor enchimento de grãos e aumento da altura das plantas, além de fortalecer a resistência contra estresses abióticos, por participar de processos como síntese proteica, fotossíntese, regulação hídrica celular e formação de flores e vagens (Sardans e Peñuelas, 2021). O fósforo, por sua vez, favorece o desenvolvimento radicular, melhora o pegamento de flores e vagens e está diretamente associado ao aumento da massa dos grãos (Liao et al., 2022). O magnésio é essencial na estrutura da clorofila e na fotossíntese, além de atuar como cofator enzimático que regula a fixação de carbono e participar da síntese de DNA e RNA (Jamali et al., 2021). Já o enxofre é indispensável à síntese de proteínas e aminoácidos, impactando a produtividade e a qualidade fisiológica da cultura; sua importância é reforçada em solos de baixa matéria orgânica, como os do Cerrado, onde sua aplicação aumenta significativamente o rendimento (Broch et al., 2011; Wei et al., 2024).

Dessa forma, os incrementos na biomassa das plantas sob doses adequadas de composto orgânico refletem não apenas a melhoria na fertilidade química do solo, mas também o aporte equilibrado desses nutrientes, favorecendo maior acúmulo de fotoassimilados e melhor desempenho vegetativo.

4.5 Respostas fisiológicas

4.5.1 Fluorescência da clorofila

A fluorescência da clorofila é um importante indicador não destrutivo do desempenho fotoquímico das plantas, permitindo avaliar a eficiência do fotossistema II e detectar possíveis estresses antes mesmo de efeitos visíveis

no crescimento. Para verificar se a aplicação de composto orgânico influenciou a atividade fotossintética da soja, foram avaliados, aos 30 e 60 dias após a semeadura, os parâmetros de fluorescência F_0 , F_v , F_m , F_v/F_m e F_v/F_0 , apresentados nas (Tabelas 14 e 15).

Tabela 14. Valores médios de Fluorescência inicial (F_0), Fluorescência variável (F_v), Fluorescência máxima (F_m), Eficiência Fotoquímica (F_v/F_m) e Dectetor de estresse (F_v/F_0) de *Glycine max* L., no experimento em vasos aos 30 dias após o plantio, com diferentes adubações em porcentagem de massa (% m/m): controle, composto: 1%, 3%, 5% e adubação química.

	Clorofila $\mu\text{mol}/\text{m}^2$	F_0	F_v	F_m	F_v/F_m	F_v/F_0
Controle	36,97a	222,60a	469,80a	692,40a	0,63a	2,28a
1% m/m	38,32a	184,20a	577,60a	761,80a	0,75a	3,15a
3% m/m	41,70a	219,60a	530,40a	750,00a	0,68a	2,59a
5% m/m	41,70a	184,20a	575,20a	759,40a	0,75	3,15a
Adubação química	40,25a	222,00a	519,00a	741,00a	0,67a	2,42a
DMS (5%)	12,21	63,31	278,33	227,95	0,25	1,58

Tabela 15. Valores médios de Fluorescência inicial (F_0), Fluorescência variável (F_v), Fluorescência máxima (F_m), Eficiência Fotoquímica (F_v/F_m) e Dectetor de estresse (F_v/F_0) de *Glycine max* L., no experimento em vasos aos 60 dias após o plantio, com diferentes adubações em porcentagem de massa (% m/m): controle, composto: 1%, 3%, 5% e adubação química.

	Clorofila $\mu\text{mol}/\text{m}^2$	F_0	F_v	F_m	F_v/F_m	F_v/F_0
Controle	42,83a	190,50a	609,16a	799,66a	0,759a	3,20a
1% m/m	42,66a	218,66a	570,50a	789,16a	0,727a	2,71a
3% m/m	41,16a	202,00a	585,33a	787,33a	0,745a	2,99a
5% m/m	40,33a	210,16a	650,00a	860,16a	0,755a	3,10a
Adubação química	39,33a	176,16a	560,66a	736,83a	0,761a	3,23a
DMS (5%)	5,99	87,75	225,34	299,28	0,04	0,80

Os resultados apresentados nas Tabelas 14 e 15 mostram que não houve diferenças estatísticas significativas ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos para nenhum dos parâmetros avaliados de fluorescência da clorofila. Isso indica que tanto a aplicação de composto orgânico, mesmo nas doses mais elevadas (5% m/m), quanto a adubação química não afetaram a fluorescência da clorofila, sugerindo

ausência de estresse fotossintético e manutenção da eficiência do aparato fotossintético da soja aos 30 e 60 dias após a semeadura.

Estudos de Zhang et al. (2024) relatam que sistemas de manejo com aporte orgânico favorecem a integridade das membranas tilacoidais e reduzem danos oxidativos, mantendo os valores de F_v/F_m próximos ao ótimo fisiológico ($\approx 0,83$), característico de plantas não estressadas. De forma semelhante, no presente estudo, os parâmetros F_v/F_m e $Y(II)$ permaneceram estáveis, confirmando que o composto orgânico não reduziu a eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII).

Em condições adversas, como salinidade e acidificação, a literatura descreve reduções expressivas do rendimento quântico ($Y(II)$) efetivo do PSII e da eficiência máxima (F_v/F_m), com valores variando de 0,627 a 0,800 para $Y(II)$ e de 0,668 a 0,805 para F_v/F_m , evidenciando a sensibilidade do PSII ao estresse. No presente estudo, a ausência dessas quedas indica que o insumo orgânico não impôs carga de estresse fotoquímico, preservando a integridade e a funcionalidade do PSII (Tomaškinova et al., 2025).

Assim, os resultados, aliados às evidências da literatura, demonstram que a compostagem devidamente estabilizada tende a criar um ambiente favorável à fotossíntese, assegurando a eficiência do PSII e contribuindo para o bom desempenho fisiológico da soja ao longo do ciclo.

4.5.2 Conteúdo relativo de água (CRA) e extravasamento de eletrólitos (EL)

Os resultados de CRA e EL obtidos nesta pesquisa demonstram que a aplicação do composto orgânico influenciou o estado hídrico e a integridade das membranas celulares das plantas de soja de forma diferenciada ao longo do ciclo. Aos 30 dias após a semeadura (Tabela 16), observou-se que o tratamento com adubação química apresentou maior CRA, indicando melhor retenção de água nas células nesse estágio inicial, enquanto o tratamento com 1% m/m apresentou o menor valor. Em relação ao extravasamento de eletrólitos (EL), o tratamento com 3% m/m apresentou o menor índice, sugerindo menor estresse celular, ao passo que o tratamento com 1% m/m exibiu o maior EL. Ainda assim, tais alterações não se refletiram em prejuízos evidentes nos parâmetros biométricos avaliados, sugerindo que os efeitos iniciais sobre o balanço hídrico

e a integridade de membranas foram transitórios ou compensados pelo metabolismo vegetal.

Tabela 16. Valores de Conteúdo Relativo de Água (CRA) e Extravasamento de Eletrólitos (EL), no experimento em vasos aos 30 dias após o plantio, com aplicação de composto em porcentagem de massa (% m/m): controle (0), composto 1%, 3%, 5% e adubação química.

Tratamentos	Conteúdo Relativo de Água (%)	Extravasamento de eletrólitos (%)
Controle	135,07	53,06
1% m/m	100,92	84,91
3% m/m	115,79	35,48
5% m/m	123,83	69,38
Adubação química	140,82	72,83

Aos 60 dias (Tabela 17), o comportamento se inverteu parcialmente: o tratamento controle apresentou maior CRA, seguido pelas doses de 1% e 5% m/m, enquanto a adubação química apresentou o menor valor, evidenciando redução na capacidade de retenção hídrica em estágio mais avançado da cultura. O tratamento com 5% m/m também apresentou o menor valor de EL, o que indica maior integridade das membranas celulares e menor ocorrência de estresse oxidativo. Esse padrão reforça a hipótese de que a adição de matéria orgânica devidamente estabilizada pode contribuir para a melhoria da estrutura do solo e da disponibilidade hídrica, refletindo em maior resiliência das plantas ao longo do ciclo (Yusuf et al., 2025).

Tabela 17. Valores de Conteúdo Relativo de Água (CRA) e Extravasamento de Eletrólitos (EL), no experimento em vasos aos 60 dias após o plantio, com aplicação de composto em porcentagem de massa (% m/m): controle (0), composto 1%, 3%, 5% e adubação química.

Tratamentos	Conteúdo Relativo de Água (%)	Extravasamento de eletrólitos (%)
Controle	89,05	51,45
1% m/m	84,56	44,99
3% m/m	79,20	63,47
5% m/m	83,96	28,47
Adubação química	73,61	82,60

Estudos recentes confirmam que fontes orgânicas de nutrientes tendem a melhorar a homeostase hídrica das plantas e a reduzir a peroxidação lipídica em condições não limitantes de água, mantendo a integridade das membranas

celulares. De acordo com Aires et al. (2025), sistemas de manejo com aporte orgânico reduzem o estresse oxidativo, evitando aumentos expressivos no extravasamento de eletrólitos e garantindo maior estabilidade fisiológica. De forma semelhante, Zhao et al. (2025) destacaram que a adição de compostos orgânicos, pela liberação gradual de nutrientes e estímulo à microbiota do solo, proporciona melhor status hídrico às plantas e reduz danos estruturais às membranas, refletidos em menores valores de EL.

No presente estudo, a coerência entre CRA elevado e EL reduzido em doses mais altas de composto orgânico (especialmente aos 60 dias) sugere que este insumo pode contribuir para maior tolerância fisiológica da soja, favorecendo tanto a absorção de água quanto a integridade celular. Esses resultados reforçam a importância de estratégias de manejo orgânico na promoção de ambientes radiculares mais estáveis e na mitigação de fatores de estresse, com reflexos positivos no desempenho fisiológico da cultura ao longo do ciclo.

4.6 Análise metabolômica por ressonância magnética nuclear de Hidrogênio (RMN de ^1H)

4.6.1 RMN de ^1H das plântulas de *Glycine max* L.

O espectro de Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ^1H) obtido das plântulas de *Glycine max* L. aos 9 dias após a semeadura revelou diferenças sutis nos perfis metabólicos entre os tratamentos com compostagem (1%, 3% e 5% m/m) e o controle (Figura 3). Entre os compostos identificados, destacam-se aminoácidos como valina, isoleucina, fenilalanina, tirosina e triptofano; o neurotransmissor vegetal 4-aminobutirato (GABA); além de trigonelina, acetato e o carboidrato sacarose. Esses metabólitos pertencem principalmente às classes de aminoácidos, ácidos orgânicos e açúcares, refletindo alterações fisiológicas relacionadas à nutrição e ao metabolismo energético das plântulas. Para aprofundar a análise das variações metabólicas, foram aplicadas as abordagens estatísticas de Análise de Componentes Principais (PCA), ANOVA one-way com teste post hoc de Tukey HSD ($p < 0,05$) e Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA) (Figura 4).

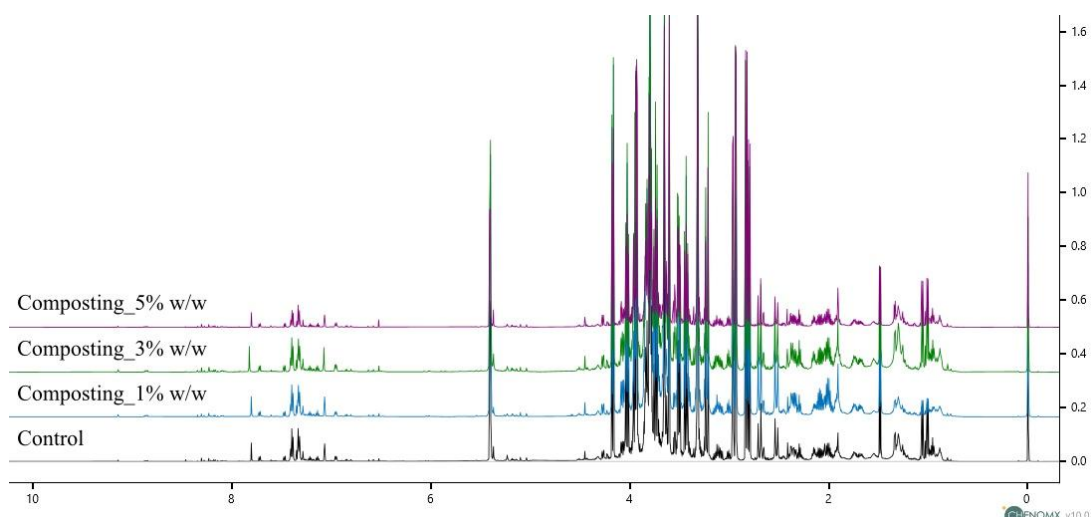


Figura 3. Espectros de RMN de ^1H (tampão KH_2PO_4 em D_2O /metanol- d_4 1:1, 600 MHz) dos extratos plântulas de soja cultivadas no sistema *in vitro* sem composto (C, controle) e com composto nas doses de 1% m/m, 3% m/m e 5% m/m (T1, T3 e T5, respectivamente).

A Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 4) revelou clara separação entre os grupos experimentais com base nas concentrações relativas dos metabólitos detectados nas plântulas de *Glycine max* L., evidenciando alterações metabólicas induzidas pelos diferentes níveis de composto aplicados (1% m/m, 3% m/m e 5% m/m) em comparação ao controle (Figura 4), em comparação ao controle. Os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram conjuntamente 66,5% da variância total dos dados, sendo 47,7% atribuídos ao PC1 e 18,8% ao PC2.

O tratamento com 1% m/m de composto apresentou forte associação com metabólitos como trigonelina, acetato e sacarose, os quais estão relacionados ao metabolismo energético e à sinalização celular (Li et al., 2023). Em contrapartida, os tratamentos com 3% m/m e 5% m/m mostraram maior dispersão no espaço multivariado, porém com proximidade a compostos associados à resposta ao estresse e ao crescimento celular, como o 4-aminobutirato (GABA) e os aminoácidos essenciais valina, isoleucina, fenilalanina, tirosina e triptofano (Barnawal et al., 2019). Esses resultados sugerem uma possível indução de rotas metabólicas específicas em função da dose de composto aplicada. O grupo controle apresentou perfil metabólico distinto, com menor acúmulo dos metabólitos supracitados, o que reforça a hipótese de que o composto exerce efeito direto sobre a modulação metabólica

das plântulas de soja, atuando potencialmente como bioestimulante em níveis adequados de aplicação.

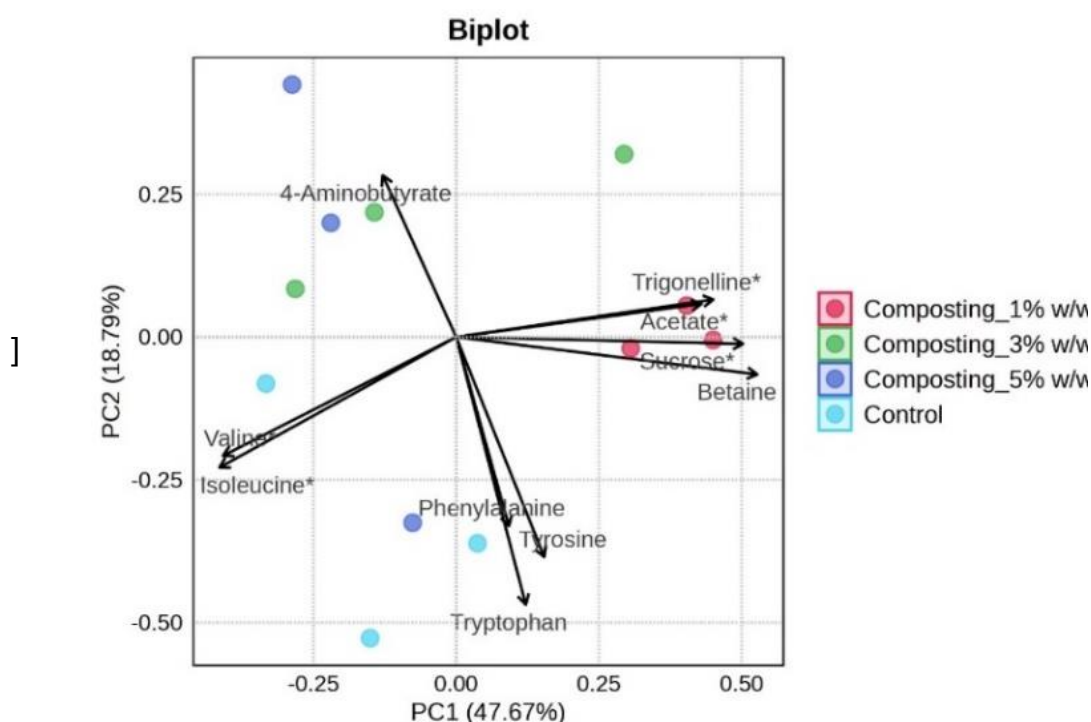


Figura 4. Análise comparativa de PCA Biplot: agupamentos de tratamento nas plântulas aos 09 dias de semeadura.

Da análise hierárquica de agrupamento (HCA), representada no heatmap (Figura 5), corrobora os padrões observados na PCA (Figura 4), evidenciando agrupamentos distintos de acordo com os tratamentos com composto. Observa-se que o tratamento com 1% m/m de composto orgânico apresentou acúmulo mais elevado de metabólitos como sacarose, colina, proline, acetato, trigonelina e formiato, todos marcados com diferença estatística significativa ($p < 0,05$), indicando resposta metabólica mais ativa associada à modulação do metabolismo primário.

Por outro lado, os tratamentos com 3% e 5% m/m apresentaram perfis mais próximos entre si e distintos do controle, com destaque para a maior abundância de aminoácidos essenciais, como valina, isoleucina, fenilalanina, tirosina e triptofano, compostos relacionados à biossíntese de proteínas e mecanismos de adaptação ao estresse (Qin et al., 2022). O grupo controle mostrou-se mais distante dos demais, reforçando sua menor atividade metabólica. Esses dados sugerem que a aplicação de composto, mesmo em

doses baixas, induz alterações significativas no metabolismo das plântulas de soja, especialmente em rotas relacionadas ao crescimento, ao acúmulo de açúcares e à resposta ao estresse oxidativo, sendo o tratamento com 1% m/m o mais responsivo do ponto de vista metabólico.

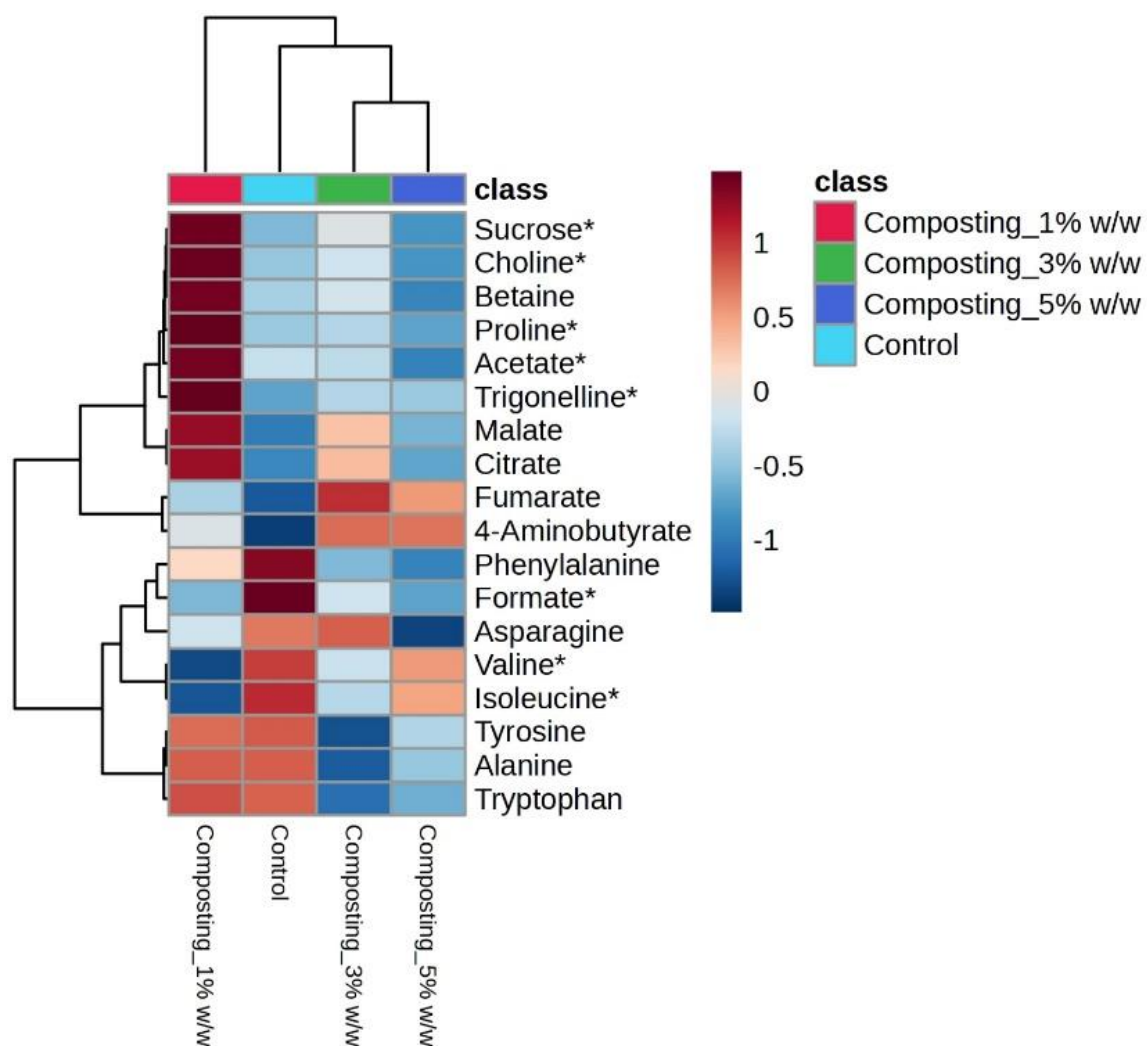


Figura 5. Dendrograma do HCA associado ao mapa de calor dos compostos quantificados nos extratos das plântulas de soja cultivadas em solo (controle) e em solo com composto, nas doses de 0, 1% m/m, 3% m/m e 5% m/m. A cor de cada mudança de seção de azul escuro a carmesim no mapa de calor corresponde a uma mudança de baixo para alto para cada concentração de metabólito.

Com base na variação dos níveis de alguns metabólitos em resposta ao uso do composto, pode-se observar que houve aumento em todas as concentrações de dois compostos intermediários do Ciclo de Krebs, Citrato e Malato (Albaladejo-Marico et al., 2024). Consequentemente, denota-se aumento

considerável da sacarose, nas plântulas cultivadas com a compostagem, especialmente na concentração a 1% (m/m). Neste viés, foi evidenciado também acúmulo do Fumarato, integrante intermediário do Ciclo do Ácido Cítrico, na concentração a 3%(m/m).

Quantidades elevadas de sacarose na concentração 1%, apontam maiores reservas metabólicas para o desenvolvimento vegetal, mas basicamente, maior possibilidade de ter um bom ajuste osmótico, graças à presença de osmossolutos em seus tecidos, ocasionando portando mitigação dos efeitos desfavoráveis do estresse hídrico (Chen et al., 2020; Jahan et al., 2021). Vale mencionar que o aumento de sacarose, pode estar relacionada à ativação dos mecanismos de defesa ao estresse provocado pelas amostras de biocomposto, visto que a função osmoprotetora da sacarose em soja é bastante evidenciada.

Ademais, foram encontrados acúmulos para betaína, prolina, colina e trigonelina, basicamente para os extratos das plântulas de soja cultivadas na concentração de 1% (m/m). Estas substâncias também agem como osmoprotetores (Barnawal et al. 2019; Mehta e Vyas, 2023). Vale destacar, que a betaína pode estabilizar a estrutura de proteínas, como Rubisco; proteger o aparelho fotossintético e seu desempenho como eliminação de Espécies Reativas de Oxigênio-EROS (Filipčev et al., 2018).

Por outro lado, foi detectado alta concentração nos níveis do aminoácido triptofano na dose 1% em comparação com o controle. Mukherjee (2014) menciona a importância do aminoácido triptofano, tendo em vista que o mesmo ao ser degradado é responsável por produzir auxina e este fitormônio tem um papel fundamental para o alongamento celular. Levando em consideração a auxina em associação com giberelina, ácido jasmônico, ácido salicílico e ABA, estas moléculas influenciam positivamente o funcionamento da proteína PIN, a qual desempenha um papel crucial na protrusão da radícula (Wan et al., 2018).

4.6.2 RMN de ^1H das plantas de *Glycine max* L.

A análise aos 60 dias após o plantio dos espectros de RMN de ^1H revelou que, visualmente, não houve diferenças marcantes entre os tratamentos (Figura 6). Os espectros apresentaram perfis metabólicos semelhantes, com variações

sutis na intensidade dos sinais, sugerindo que as alterações decorrentes da aplicação da compostagem poderiam estar relacionadas às concentrações dos metabólitos. Para investigar melhor essas diferenças, realizou-se o teste ANOVA one-way com teste post hoc de Tukey HSD ($p < 0,05$). Dos 243 bins analisados, 66 apresentaram diferenças significativas, enquanto 177 não foram significativos (Figura 7). Com base nesses resultados, os bins significativos foram selecionados para compor a matriz de dados utilizada na PCA. Essa abordagem quimiométrica permitiu identificar padrões de distribuição entre os grupos e destacar as variáveis que mais contribuíram para a sua separação.

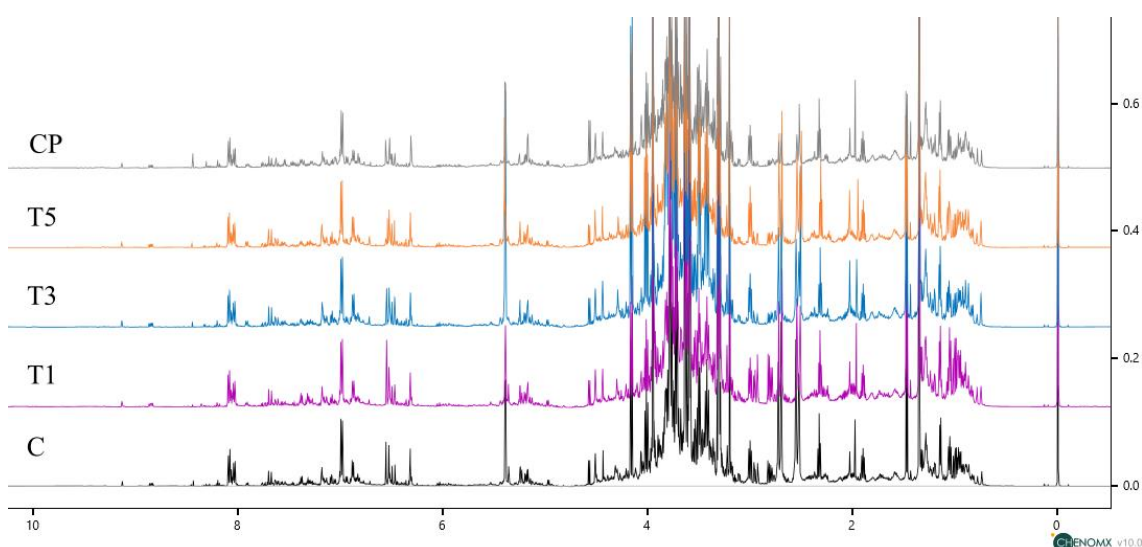


Figura 6. Espectros de RMN de ^1H (tampão KH_2PO_4 em D_2O /metanol- d_4 1:1, 600 MHz) dos extratos de folhas de soja cultivadas em solo sem adubação química (C, controle), com adubação química (CP, controle positivo) e com composto nas doses de 1% m/m, 3% m/m e 5% m/m (T1, T3 e T5, respectivamente).

A PCA (Figura 8) revelou que os dois primeiros componentes principais, PC1 e PC2, explicaram 64,4% da variância total dos dados, sendo 45,7% por PC1 e 18,7% por PC2. A distribuição das amostras revelou uma separação entre os grupos controle (C) e controle positivo (CP). Entre os tratamentos com compostagem, observou-se um efeito dependente da dose: T1 apresentou um perfil semelhante ao do controle, sem uma separação evidente, enquanto T5 se diferenciou dos demais grupos, indicando uma modulação mais acentuada do metaboloma foliar. O tratamento T3 exibiu uma distribuição variável. Esses

resultados indicam que a compostagem influenciou o perfil metabólico foliar da soja, com efeitos dependentes da dose aplicada.

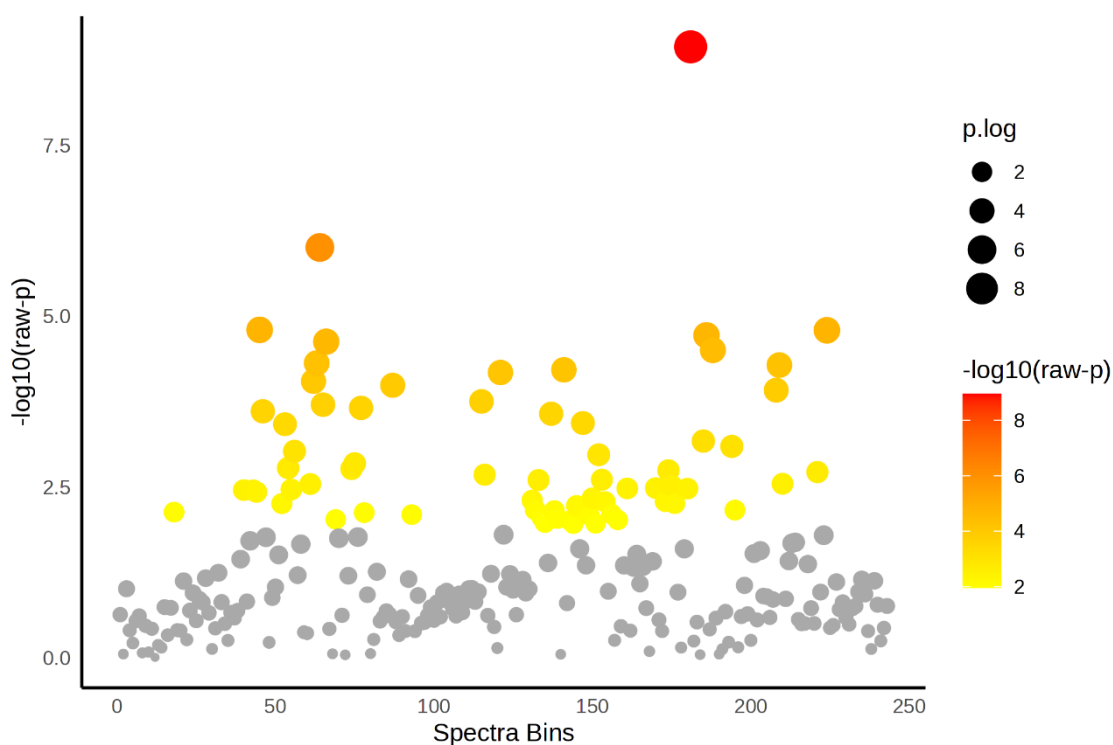


Figura 7. Gráfico dos valores de $-\log(p\text{-valor})$ obtidos a partir da ANOVA one-way. Os bins não significativos são apresentados em cinza ($n = 177$).

Para entender melhor quais metabólitos estavam associados à separação observada, analisou-se o gráfico dos pesos, identificando os bins mais influentes nos componentes principais (Figura 9). A análise desse gráfico revelou que os sinais da sacarose (3,52-5,44 ppm) contribuíram para a separação em PC1, enquanto os sinais do ácido cítrico (2,56–2,72 ppm), da asparagina (2,80–2,96 ppm) e do pinitol (3,60 e 3,96 ppm) foram determinantes para a separação em PC2. Além desses metabólitos, outros sinais também podem ter contribuído para a discriminação entre os grupos experimentais, porém, devido à complexidade dos espectros, não foi possível associá-los diretamente a compostos específicos.

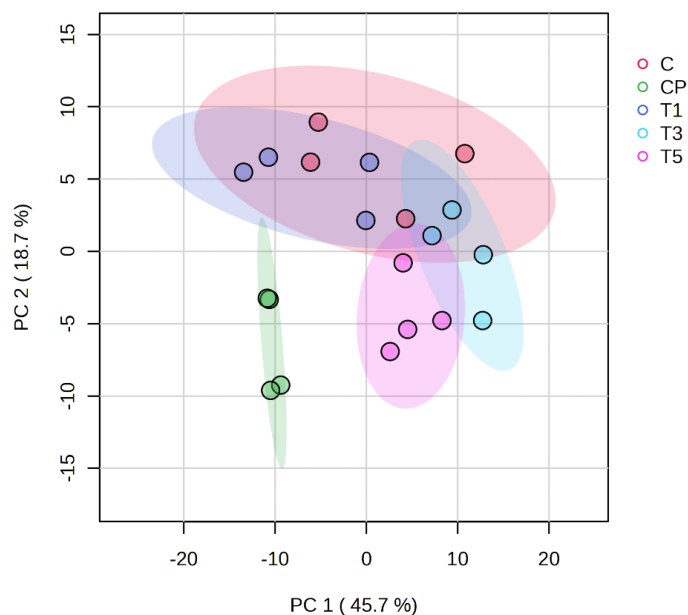


Figura 8. Gráfico de escores da componente 1 (PC1) versus componente 2 (PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA), obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de soja cultivadas em solo sem adubação química (C, controle), com adubação química (CP, controle positivo) e com composto nas doses de 1% m/m, 3% m/m e 5% m/m (T1, T3 e T5, respectivamente).

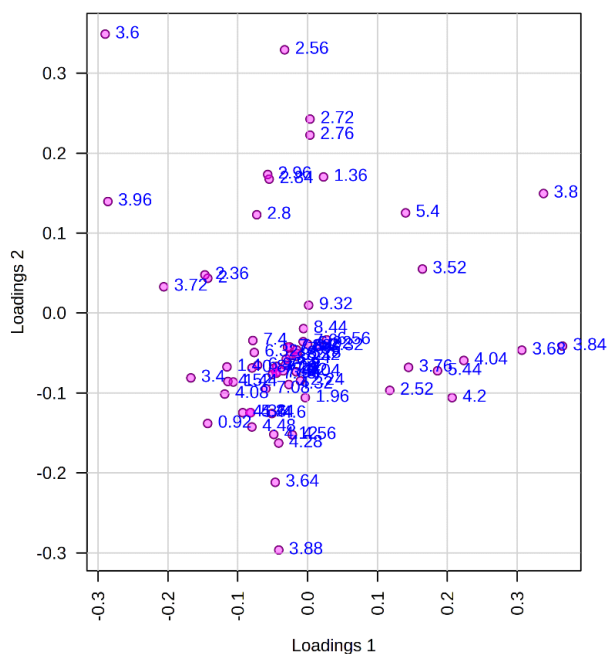


Figura 9. Gráfico de pesos da Análise de Componentes Principais (PCA), obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de soja cultivadas em solo sem adubação química (C, controle), com adubação química (CP, controle positivo) e com composto nas doses de 1% m/m, 3% m/m e 5% m/m (T1, T3 e T5, respectivamente).

Finalmente, a visualização dos dados por meio de um mapa de calor (Figura 10), obtido a partir dos bins significativos, corroborou as conclusões da PCA. O dendrograma gerado pelo agrupamento hierárquico revelou três grupos: CP, C, e T1, T3 e T5. Esses agrupamentos foram influenciados pelas diferenças nas concentrações relativas dos metabólitos. Observou-se que as concentrações relativas de ácido cítrico, asparagina e pinitol eram mais elevadas em C e T1, enquanto a sacarose apresentou maiores concentrações relativas em T3. Além disso, vale destacar que as plantas do tratamento CP foram mais ricas em compostos aromáticos (δ 6,50-9,00).

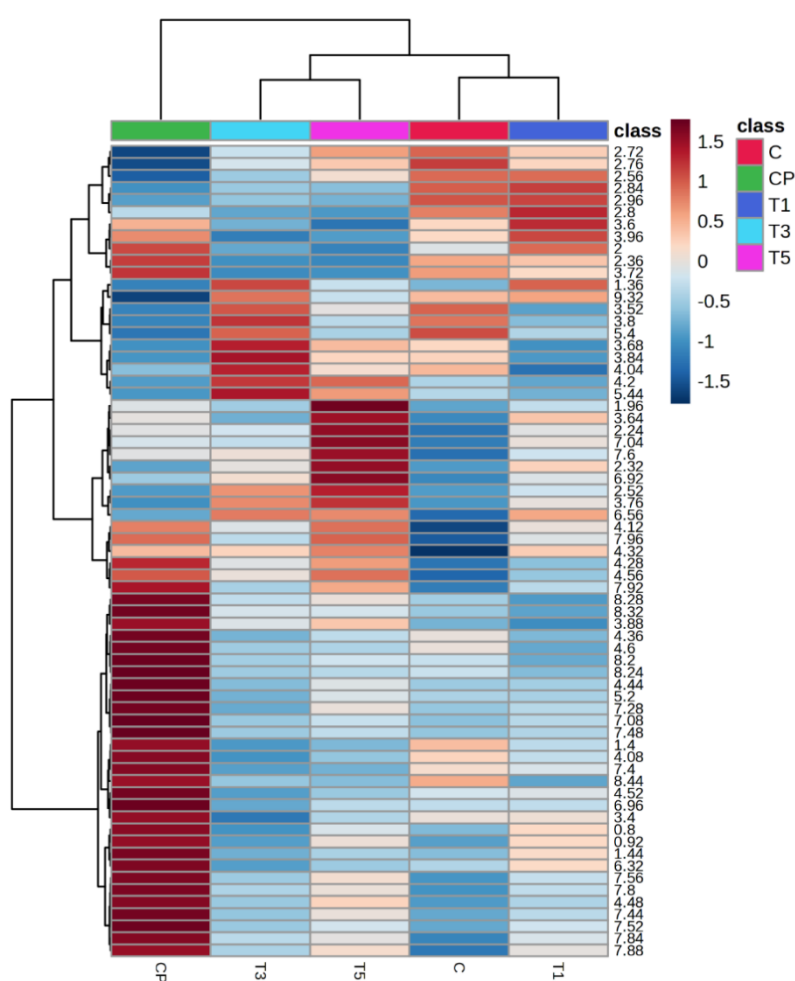


Figura 10. Dendrograma do HCA associado ao mapa de calor dos bins obtidos a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de soja cultivadas em solo sem adubação química (C, controle), com adubação química (CP, controle positivo) e com composto nas doses de 1% m/m, 3% m/m e 5% m/m (T1, T3 e T5, respectivamente). A cor de cada mudança de seção de azul escuro a carmesim no mapa de calor corresponde a uma mudança de baixo para alto na área de cada bin.

Altas quantidades de sacarose na concentração de 3% m/m indicam maiores reservas metabólicas para o desenvolvimento da planta, mas, basicamente, maior possibilidade de haver um bom ajuste osmótico, graças à presença de osmosolutos em seus tecidos, mitigando assim os efeitos desfavoráveis do estresse hídrico (Chen et al., 2020; Jahan et al., 2021). Vale destacar que o aumento nos níveis de sacarose pode estar associado à ativação de mecanismos de defesa da planta frente ao estresse induzido pelas amostras de biocomposto, considerando que a sacarose exerce uma função osmoprotetora bem estabelecida na soja. Esse acúmulo pode representar uma resposta adaptativa, contribuindo para a manutenção da integridade celular e do equilíbrio osmótico sob condições adversas (Mehta e Vyas, 2023; Silva et al., 2024; Wu et al., 2025).

O ácido cítrico é um composto orgânico essencial no metabolismo vegetal, desempenhando papel central no ciclo de Krebs e destacando-se por sua atuação na resposta a estresses abióticos. Evidências demonstram que sua aplicação exógena pode mitigar os efeitos tóxicos de metais pesados, como o chumbo, promovendo o crescimento vegetal, aumentando a biomassa, os teores de pigmentos fotossintéticos e a atividade de enzimas antioxidantes, conforme observado por Mallhi et al. (2019) em plantas de mamona (*Ricinus communis* L).

Portanto, o ácido cítrico pode atuar como um indicador metabólico de melhor desempenho vegetal, favorecendo a absorção de nutrientes, a modulação da resposta ao estresse e, conseqüentemente, o acúmulo de biomassa nas condições avaliadas (Natasha et al., 2025)

A asparagina, aminoácido relacionado ao transporte e armazenamento de nitrogênio nas plantas, apresentou maior acúmulo nos tratamentos T1 (1% m/m) e controle, conforme indicado pela análise metabolômica. Coincidentemente, esses tratamentos também resultaram no maior número de nódulos, aos 30 e 60 dias, respectivamente. Esse padrão sugere que a maior disponibilidade de asparagina pode ter favorecido a simbiose com rizóbios, influenciando positivamente a nodulação de forma dependente do estágio de desenvolvimento da planta (Chen et al., 2022).

O pinitol é um ciclitol com reconhecida função osmoprotetora, especialmente em leguminosas como a soja, atuando na proteção contra estresses abióticos por meio da regulação do balanço hídrico e da redução de

danos oxidativos. No presente estudo, o acúmulo de pinitol no T1 e controle, pode indicar uma resposta adaptativa ao estresse induzido pelas condições do solo com biocomposto, contribuindo para a manutenção da homeostase celular e para o desempenho fisiológico das plantas (Cao et al., 2024).

5 CONCLUSÃO

A aplicação de composto orgânico à base de esterco bovino promoveu melhorias nos atributos microbiológicos do solo, refletidas no aumento do carbono orgânico total, da biomassa microbiana e da atividade enzimática, além de influenciar positivamente a fisiologia da soja e modular seu metabolismo. Esses resultados confirmam as hipóteses propostas e demonstram que os objetivos da pesquisa foram plenamente atingidos, evidenciando que diferentes doses exercem efeitos distintos, cuja escolha deve ser orientada pelas metas específicas do manejo agrícola.

6 REFERÊNCIAS

Aires ES, Ferraz AKL, Ribera L, Teixeira FP, Carvalho BL, Silva DMR, Freschi L, Rodrigues JD, Ono EO (2025) The application of salicylic acid minimizes the deleterious effects of water deficit in tomato through metabolic and ABA adjustments. **Plant Physiology and Biochemistry** 2025:110417.

Albaladejo-Marico L, Carvajal M, Yepes-Molina L (2024) Involvement of glucosinolates and phenolics in the promotion of broccoli seedling growth through the modulation of primary and secondary metabolism. **Plant Science** 347:112205.

Alonso-Martínez D, Jiménez-Parra B, Cabeza-García L (2024) Theoretical framework to foster and assess sustainable agriculture practices: Drivers and key performance indicators. **Environmental and Sustainability Indicators** 23:100434.

Anderson TH, Domsch KH (1993) The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry** 25: 393-395.

AOSA – Association of Official Seed Analysts (1983) **Seed vigor testing handbook**. Ithaca, NY: AOSA. 89 p. (Contribution, 32).

Arslanoglu SF (2022) The effects on the root and plant development of soybean of organic fertilizer applications. **Bioscience Journal** 38: e38036.

Azevedo Neto AD, Pereira PPA, Costa DP, Santos ACC (2011) Fluorescência da clorofila como uma ferramenta possível para seleção de tolerância à salinidade em girassol. **Revista Ciência Agronômica** 42:893–897.

Barbosa JC, Maldonado WJ (2015) **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 396 p.

Barnawal D, Singh R, Singh RP (2019) Role of plant growth promoting rhizobacteria in drought tolerance: regulating growth hormones and osmolytes. In: Singh AK, Kumar A, Singh PK (Eds.) **PGPR amelioration in sustainable agriculture**. Cambridge: Woodhead Publishing, p. 107-128.

Bebeley JF, Kamara AY, Jibrin JM, Tofa AI, Solomon R, Kamai N (2024) Effect of combined use of supplementary irrigation, manure and P fertilization on grain yield and profitability of soybean in northern Nigeria. **Heliyon** 10:e28749.

Belo SRS (2011) **Avaliação de fitotoxicidade através de *Lepidium sativum* no âmbito de processos de compostagem**. 79 f. Dissertação (Mestre em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Bradley CA, Allen TW et al. (2021) Soybean yield loss estimates due to diseases in the United States and Ontario, Canada, from 2015 to 2019. **Plant Health Progress** 22(4):483–495.

Brasil (2009) **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA. 399 p.

Broch DL, Pavinato PS, Possentti JC, Martin TN, Del Quiqui EM (2011) Soybean grain yield in cerrado region influenced by sulphur sources. **Revista Ciência Agronômica** 42:791–796.

Campos MCC, Soares MDR, Nascimento MF, Silva DMP (2016) Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas. **Revista Ambiente & Água**:11: 340-349.

Cao T, Zang X, Ren J, Liu J, Yang D (2024) Cover crop alters rhizosphere sediments to recruit plant growth-promoting microorganisms, enhancing peanut production. **Applied Soil Ecology** 203:105620.

Cardoso MJ, Bastos EA, Andrade Júnior AS, Athayde Sobrinho C (Eds.) (2017) Feijão Caupi: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 244 p.

Casida LE, Klein DA, Santoro T (1964) Soil dehydrogenase activity. **Soil Science** 98: 371-376.

Cesarano G, De Filippis F, La Stora A, Scala F, Bonanomi G (2017) Organic amendment type and application frequency affect crop yields, soil fertility and microbiome composition. **Applied Soil Ecology** 120:254–264.

Chen L, Liu L et al. (2020) Exogenous melatonin promotes seed germination and osmotic regulation under salt stress in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Plos One** 15: 0228241.

Chen Z, Zhong W et al. (2022) Integrative analysis of metabolome and transcriptome reveals the improvements of seed quality in vegetable soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). **Phytochemistry** 200:113216.

CONAB. **Portal de Informações Agropecuárias**. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>>. Acesso em: 24 Jul. 2025.

Cong M, Zhang Z et al. (2025) Shifts in microbial- and plant-derived biomass degradation genes with afforestation promoting carbon accumulation. **Journal of Environmental Management** 390.

Denoncourt C, Chantigny MH, Angers DA, Maillard É, Halde C (2025) Animal manure application promotes nitrogen and organic carbon accumulation in soil organic matter fractions: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment** 996:180097.

Diniz Filho E, Teixeira M, Luciene X, Oliveira A M de, Nunes, CGF (2007) A prática da compostagem no manejo sustentável dos solos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável** 2: 27-36, 2007.

Du TY, He HY, Zhang Q, Lu L, Mao WJ, Zhai MZ (2022) Positive effects of organic fertilizers and biofertilizers on soil microbial community composition and walnut yield. **Applied Soil Ecology** 175:104457.

ECYCLE (2024) **Entenda o que é agricultura regenerativa**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/agricultura-regenerativa/>>. Acesso em 21 ago.2024.

Emino E, Warman P (2004) Biological assay for compost quality. **Compost Science and Utilization** 12:342-348.

Filipčev B, Kojić J, Krulj J, Bodroža-Solarov M, Ilić N (2018) Betaine in cereal grains and grain-based products. **Foods** 7: 49.

FORBES (2023) **A saga da soja no Brasil**: como o grão dominou as lavouras do país. Disponível em:<<https://forbes.com.br/forbesagro/2023/01/a-saga-da-soja-no-brasil-como-o-grao-dominou-as-lavouras-do-pais>>. Acesso em: 19 ago. 2024.

Franzini VI, Muraoka T, Coraspe-León HM, Mendes FL (2009) Efficiency of reactive phosphate rock applied in mixtures with triple superphosphate in maize and soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44(9).

Fuentes-Ponce M, Moreno-Espíndola IP, Sánchez-Rodríguez LM, Ferrara-Guerrero MJ, López-Ordaz R (2016) Dehydrogenase and mycorrhizal colonization: tools for monitoring agrosystem soil quality. **Applied Soil Ecology** 100:144–153.

Garcia Lucas KR, Andrade EP, Antón A, Ralisch R, Ventura MU (2021) Using the available indicators of potential biodiversity damage for Life Cycle Assessment on soybean crop according to Brazilian ecoregions. **Ecological Indicators** 127:107809.

Garcia J, Mondragon-Becerra M, Martinez I, Nocc M, Lazcano C (2024) Organic amendments alter urban soil microbiomes and improve crop quality. **Applied Soil Ecology** 191:105731.

García-Pérez P, Losada-Barreiro S, Bravo-Díaz C, Gallego PP, Lucini L (2025) Plant oxidative stress and specialized metabolites: a holistic physicochemical and metabolomics perspective. **Plant Physiology and Biochemistry** 227:110093.

Gascó G, Cely Parra P, Paz-Ferreiro J, Plaza C, Méndez A (2016) Relation between biochar properties and effects on seed germination and plant development. **Biological Agriculture & Horticulture** 32:1–11.

Gazola CV, Lopes FHA, Prates TX, Carvalho JP, Silva RA (2017) Benefícios das plantas de cobertura e plantio direto em sistemas de agricultura orgânica regenerativa – uma visão geral. **Revista Conexão Eletrônica** 14(1):474–484.

Gazzoni DL, Dall'agnol AA (Eds.) (2018) A saga da soja: de 1050 a. C. a 2050 d. C. Brasília: Embrapa, 199 p.

Chiriack OP, Pittarello M, Moretti B, Zavattaro L (2025) Factors influencing nitrogen derived from soil organic matter mineralisation: Results from a long-term experiment. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 381:109444.

Gitti DC, Roscoe R, Rizzato LA (2019) Manejo e fertilidade do solo para a cultura da soja. In.: Lourenção ALF, Grigolli JFJ (Eds) **Tecnologia e Produção: Safra 2019/2020**. Maracaju: Fundação MS, p.15-38.

Gogoi B, Kalita B, Sutradhar P, Sharma KK, Bhupenchandra I (2021) Soil carbon, microbial biomass carbon, soil health and productivity of toria (*Brassica campestris* L.) crop as affected by the application of organic manures. **Journal of Environmental Biology** 42:1379-1386.

Grijseels S, Vasskog T, Heinsvig PJ, Myhre TN, Hansen T, Mardal M (2024) Validation of two LCHRMS methods for large-scale untargeted metabolomics of serum samples: Strategy to establish method fitness-for-purpose. **Journal of Chromatography A** 1732:465230.

Guo Z, Zheng J, Jia X, Bourque CPA, Zha T, Jin C, Xu M, Li X (2025) Biogeographic variations in soil respiration and its basal rate across China suggest thermal adaptation, substrate limitation, and soil moisture constraint. **Catena** 254:108992.

Han B, Wei Y, Fan R, Zhang S, Ren X, Zhou W, Zhang D, Xu Q, Bian M (2025) Metabolomic analysis of volatile and non-volatile compounds in mulberry leaf white tea processed with different withering methods. **Food Chemistry** 482:144103.

Harbourne N, Marete E, Jacquier JC, O'Riordan D (2009) Effect of drying methods on the phenolic constituents of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) and willow (*Salix alba*). **LWT - Food Science and Technology** 42:1468–1473.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) **Rebanho de bovinos (bois e vacas)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>>. Acesso em: 26 jul.2025.

ILSA (2020) **Fósforo e suas interações com a matéria orgânica**. Disponível em: <https://ilsabrasil.com.br/fosforo-e-suas-interacoes-com-a-materia-organica/>>. Acesso em: 20 ago.2024.

Indriani S, Suryati D, Pujiwati H, Prasetyo, Sukarjo EI (2021) Growth and yield component of two varieties of soybeans (*Glycine max* L. Merrill) in some types of amelioration in Ultisol. **Terra** 4:9-16.

Irving D, Bakhshandeh S, Tran TKA, McBratney AB (2024) A cost-effective method for quantifying soil respiration. **Soil Security** 16: 100162.

Islam KR, Weil RR (2000) Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 79: 9-16.

Jahan MS, Shu S et al. (2021) Melatonin pretreatment confers heat tolerance and repression of heat-induced senescence in tomato through the modulation of ABA- and GA-mediated pathways. **Frontiers in Plant Science** 12: 381-392.

Jamali Jaghdani S, Jahns P, Tränkner M (2021) Mg deficiency induces photo-oxidative stress primarily by limiting CO₂ assimilation and not by limiting photosynthetic light utilization. **Plant Science** 302:110751.

Jansson JK, Hofmockel KS (2020) Soil microbiomes and climate change. **Nature Reviews Microbiology**:18, 35-46.

Jónsson JÖG, Davíðsdóttir B (2016) Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems** 145:24-38.

Jansson JK, Hofmockel KS (2020) Soil microbiomes and climate change. **Nature Reviews Microbiology**:18, 35-46.

Khan MT, Butkevičienė LM, Aleinikovienė J (2024) Innovative organic fertilizers and cover crops: perspectives for sustainable agriculture in the era of climate change and organic agriculture. **Agronomy** 14:2871.

Kim EH, Kim SL, Kim SH, Chung IM (2012) Comparison of isoflavones and anthocyanins in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seeds of different planting dates. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 60:10196–10202.

Kong X, Li Q, Zhao Y, Wang Z, Zhang H, Chen J (2025) Soil fertility regulates microbial metabolic efficiency and carbon–nitrogen cycling in agroecosystems. **Geoderma** 495:116945.

Kong Y, Wang G, Chen W, Yang Y, Ma R, Li D, Shen Y, Li G, Yuan J (2022) Phytotoxicity of farm livestock manures in facultative heap composting using the seed germination index as indicator. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 247:114251.

Konzen EA (1999) **Manejo e utilização de esterco bovino**. Sete lagoas: Embrapa Milho e Sorgo: Comunicado Técnico 14.

Konzen EA, Alvarenga RC (2002) **Cultivo do milho com adubação orgânica**. Sete lagoas: Embrapa Milho e Sorgo: Comunicado Técnico 54.

Koorneef GJ, Pulleman MM, Comans RNJ, Van Rijssel SQ, Barré P, Baudin F, de Goede RGM (2024) Assessing soil functioning: What is the added value of soil organic carbon quality measurements alongside total organic carbon content? **Soil Biology and Biochemistry** 196:109507.

Kostensalo J, Saarinen M, Lemola R, Salo T, Ukonmaanaho L (2024) A site-specific prediction model for nitrogen leaching in conventional and organic farming. **Journal of Environmental Management** 349:119388.

Kou H, Liao Z, Liu Y, Lai Z, Li Z, Fan J (2025) Row configuration affects plant growth and grain yield of drip-irrigated maize-soybean strip intercropping system by regulating photosynthetic capacity and grain filling process. **Journal of Agriculture and Food Research** 21:101920.

Krause L, Klumpp E, Nofz I, Missong A, Amelung W, Siebers N (2020) Colloidal iron and organic carbon control soil aggregate formation and stability in arable Luvisols. **Geoderma** 374:114421.

Kumar S, Dhar S, Barthakur S, Rajawat MVS, Kochewad SA, Kumar S, Kumar D, Meena LR (2021) Farmyard manure as K-fertilizer modulates soil biological activities and yield of wheat using the integrated fertilization approach. **Frontiers in Environmental Science** 9:764489.

Kumari M, Sheoran S, Prakash D, Yadav DB, Yadav PK, Jat MK, Ankit, Apurva (2024) Long-term application of organic manures and chemical fertilizers improve the organic carbon and microbiological properties of soil under pearl millet-wheat cropping system in North-Western India. **Heliyon** 10(3): e25333.

Kumari VV, Gopinath KA, Chandran MAS, Sunitha B, Sriram K, Ansari MA, Rao MS, Singh VK (2025) The importance of sulphur in oilseed production – A South Asian context. **Oil Crop Science** 10(2): 118–130.

Leite JNF, Cruz MCP, Ferreira ME, Andrioli I, Braos LB (2016) Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciados por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51(11):1880–1889.

Lestari PG, Sinaga AOY, Marpaung DSS, Nurhayu W, Oktaviani I (2024) Application of organic fertilizer for improving soybean production under acidic stress. **Oil Crop Science** 9: 46–52.

Li X, Yu S, Zhang S, Xiong Y, Zhou F, Tang L (2025) Integrated the rhizosphere soil microbiota and metabolome reveal mechanisms inhibiting *Phytophthora nicotianae* under long-term bio-organic fertilizer application. **Biological Control** 205:105774.

Li Y, Li L, Zhang X, Mu Q, Tian J, Yan J, Guo L, Wang Y, Song L, Yu X (2023) Differences in total phenolics, antioxidant activity and metabolic characteristics in peach fruits at different stages of ripening. **LWT** 178:114586.

Liang C, Balser TC (2011) Microbial production of recalcitrant organic matter in global soils: implications at productivity and climate policy. **Nature Reviews Microbiology** 9:75

Liao Z, Li X, Xue Y, Yang N, Wu Z, Liu Y (2022) Effects of Phosphorus on Growth and Development of Soybean Seedlings. **Key Engineering Materials** 905:353-358.

Lin Y, Su X et al. (2025) Partial organic substitution increases microbial diversity but has divergent effects on functional microorganisms under various fertilization regimes in an ultisol. **Climate Smart Agriculture** 2(3):100064.

López De Herrera J, Saa-Requejo A, Rocha De Moraes Rego CA, Mattei E, Rabello De Oliveira PS (2021) Distribution of organic matter fractions of an Oxisol under different integrated agricultural production systems. **EGU21-9747** <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9747>

Liptzin D, Norris CE et al. (2022). An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. **Soil Biology and Biochemistry** 172:108708.

Liu Q, Chen Z et al. (2024) Assembly of root-associated bacterial community and soil health in cadmium-contaminated soil affected by nano/bulk-biochar compost associations. **Environmental Pollution** 360:124619.

Liu S, Lin Z, Duan X, Deng Y (2024) Effects of soil microorganisms on aggregate stability during vegetation recovery in degraded granitic red soil areas. **Applied Soil Ecology** 204:105734.

Liu P, Cheng Y, Shao G (2025) Experimental study on improving the effect of microorganisms in solidifying fine-grained soil by red mud. **Soils and Foundations** 65:101562.

Lutts S, Kinet JM, Bouharmont J (1996) Effects of salt stress on growth, mineral nutrition and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. **Plant Growth Regulation** 19:207–218.

Mallhi ZI, Rizwan M et al. (2019) Citric acid enhances plant growth, photosynthesis, and phytoextraction of lead by alleviating the oxidative stress in castor beans. **Plants (Basel)** 8(11):525.

Mganga KZ, Rolando J, Kalu S, Karhu K (2024) Microbial soil quality indicators depending on land use and soil type in a semi-arid dryland in Kenya. **European Journal of Soil Biology** 121:103626.

Mendonça ES, Matos ES (2005) **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV.

Mehta D, Vyas S (2023) Comparative bio-accumulation of osmoprotectants in saline stress tolerating plants: A review. **Plant Stress**: 9:100177.

Moraes WB (2011) Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas** 5(2).

Moreira FMS, Siqueira JO (2009) **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA.

Mukherjee A, Yadav R, Marmeisse R, Fraissinet-Tachet L, Reddy MS (2019) Heavy metal hypertolerant eukaryotic aldehyde dehydrogenase isolated from metal contaminated soil by metatranscriptomics approach. **Biochimie** 160:183-192.

Mukherjee S, David A, Baluska F, Yadav S (2014) Salt stress-induced seedling growth inhibition coincides with differential distribution of serotonin and melatonin in sunflower seedling roots and cotyledons. **Physiologia plantarum** 152: 714-728.

Munoz-Rojas M (2018) Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. **Sci. Health** 5: 47-52.

Natasha K, Ahmad I, Nafees M (2025) Comparative analysis of ethylenediaminetetraacetic acid and citric acid for enhanced lead phytoremediation in wheat and maize plants. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** 67:103612.

Oades JM (1993) The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma** 56(1–4):377–400.

Oliveira Júnior A, Prochnow LI, Klepker D (2008) Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 43:623–631.

Oliveira AS, Pierangeli MAP, Sousa JB, Lopes HSS, Galbiati C, Souza CA, Claudino WV (2021) Caracterização morfológica, física e química de solos da bacia hidrográfica do médio curso do rio Teles Pires, no Município de Alta Floresta – MT. **Research, Society and Development** 10(9): e34210918157.

Omokaro GO, Kornev KP, Nafula ZS, Chikukula AA, Osayogie OG, Efeni OS (2025) Biochar for sustainable soil management: Enhancing soil fertility, plant growth and climate resilience. **Farming System** 3(4): 100167.

Ospina RA, Collazos AZ (2025) Model for assessing environmental sustainability performance in the agricultural sector: a case study on plantain cultivation. **Global Transitions** 7:175–188.

Pang Z, Zhou G, Ewald J, Chang L, Hacariz O, Basu N, Xia J (2022) Using MetaboAnalyst 5.0 for LC-HRMS spectra processing, multi-omics integration and covariate adjustment of global metabolomics data. **Nature Protocols** 17:1735-1761.

Park YJ, Park S, Mani V, Lee K, Park SU, Kim YJ, Kim JK (2025) Metabolomics reveals distinct metabolic alterations in the seeds of five soybean cultivars and the source–sink relationship. **Journal of Food Composition and Analysis** 145:107779.

Pérez-Llorca M, Jaime-Rodríguez C, Lamuela-Raventós RM, Pérez M, González-Coria J, Vallverdú-Queralt A, Hernández R, Chantry O, Romanyà J (2025) Increasing soil organic matter and short-term nitrogen availability by combining ramial chipped wood with a crop rotation starting with sweet potato. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 392:109740.

Prendergast-Miller MT, Jones DT (2021) Arable fields as potential reservoirs of biodiversity: Earthworm populations increase in new leys. **Science of The Total Environment** 789: 147880.

Pulrolnik, K (2009) **Transformações do carbono no solo**. Brasília: Embrapa: CNAC 38 p. (Embrapa-CNAC. Documentos, 264).

Qin P, Wang T, Luo Y (2022) A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. **Journal of Agriculture and Food Research** 7:100265.

Qiu Y, Fall T, Su Z, Bortolozzo F, Mussoline W, England G, Dinkins D, Morgan K, Clark M, Liu G (2022) Effect of phosphorus fertilization on yield of chipping potato grown on high legacy phosphorus soil. **Agronomy** 12:812.

Quevedo HD, Nishisaka CS, Mendes R (2023) O microbioma do solo e sua relação com a matéria orgânica. In.: Bettiol, W, Silva CA, Pellegrino CE, Martim-

Neto C L, Andrade CA (Eds.) **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília: EMBRAPA, p.125-144.

Ramadan H, Ji Y, Wang L, Kuang Q, Zhang Z (2025) Chemodiversity of dissolved organic matter in produced water correlates with the microbial community in fifteen shale gas wells. **Desalination and Water Treatment** 322:101200.

Rizwan M, Dalimunthe M, Pasaribu IA, Satriawan H (2021) The effect of organic fertilizers on growth several varieties of soybeans. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science** 883:012051.

Rosolem CA, Tavares CA (2006) Sintomas de deficiência tardia de fósforo em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30(6):385-389.

Sampaio EVSB, Oliveira NMB, Nascimento PRF (2007) Eficiência da adubação orgânica com esterco bovino e com Egeria densa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31(5).

Sandrakirana R, Arifin Z (2021) Effect of organic and chemical fertilizers on the growth and production of soybean (Glycine max) in dry land. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín** 74(3):9643-9653.

Santos ACM, Carneiro JSS, Leite RC, Souza, MAS, Freitas GA, Silva RR (2015) Adubação fosfatada com fertilizante Basiduo® na cultura da soja no oeste da Bahia. **Journal of Bioenergy and Food Science** 2(3):82–90.

Sardans J, Peñuelas J (2021) Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications. **Plants (Basel)** 10(2):419.

Schreefel L, Schulte RPO, de Boer IJM, Pas Schrijver A, van Zanten HHE (2020) Regenerative agriculture – the soil is the base. **Global Food Security** 26:100404.

Schoninger EL, Gatiboni LC, Ernani PR (2013) Fertilização com fosfato natural e cinética de absorção de fósforo de soja e plantas de cobertura do cerrado. **Semina: Ciências Agrárias** 34(1):95–106.

Searchinger T, Wiersenius S, Beringer T, Dumas, P (2013) Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. **Nature** 497:238-242.

Silva RR, Silva MLN, Cardoso EL, Moreira FMS, Curi N, Alovisi AMT (2010)

Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes-MG. **R. Bras. Ci. Solo** 34:1585-1592.

Silva DF, Raimundo EK, Forti VA (2019) Nodulation in soybean plants (*Glycine max* L. Merrill) submitted to different fertilizations. **Revista Verde** 14(3):470-475.

Slavick B (1979) **Methods of studying plant water relations**. New York: Springer Verlag, 449 p.

Song, Y. Q., Shahir, S., Abd. Manan, F. (2021). Bacterial inoculant-assisted phytoremediation of heavy metal-contaminated soil: inoculant development and the inoculation effects. **Biologia**, 76 (9): 2675-2685.

Tomaškinova J, Tomaškin J, Drimal M, Bellido J (2025) The impact of abiotic environmental stressors on fluorescence and chlorophyll content in *Glycine max* (L.) Merrill. **Agronomy** 15:263.

Vasconcellos RLF, Cardoso EJBN, Zangaro W, Menino GCO (2013) Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 181: 54-62.

Wan J, Zhang P et al. (2018) Involvement of reactive oxygen species and auxin in serotonin-induced inhibition of primary root elongation. **Journal of plant physiology** 229:89-99.

Wang W, Chen Y, Zhang J, Le T, Wang W, Xue J, Jiang H (2022) Research progress of metabonomics applied to tea processing and quality analysis. **Food Science and Technology** 47:74–81.

Wang X, Gao X, Zhang L, Zhao F, Chen J, Zhang W, Chen X (2025) Optimal nitrogen fertilizer management increased soil organic carbon density by increasing particulate organic matter proportion and plant-derived carbon in topsoil. **Soil and Tillage Research** 254: 106764.

Wei X, Zhao W, Sun Y, Dong S (2024) The impact of sulfur fertilizer concentration on the nutrient concentration of parts of the soybean plant. *Phyton-International*. **Journal of Experimental Botany** 93(8):1851-1873.

Wilpiseski RL, Aufrecht J A, Retterer ST, Sullivan MB, Graham DE, Pierce E M, Elias DA (2019) Soil aggregate microbial communities: towards understanding

microbiome interactions at biologically relevant scales. **Applied and Environmental Microbiology** 85: 324-329.

Wu DX, Wang H, Zhang QW, Wang J, Li M (2025) Dissolved organic matter characteristics of soil aggregates on slopes covered by natural successional vegetations with different root structures. **Geoderma** 459:117389.

Xia J, Wishart DS (2011) Metabolomic data processing, analysis, and interpretation using MetaboAnalyst. **Current Protocols in Bioinformatics** 34.

Xie ZH, Fu B, Liu X (2012) Research advance in soil organic carbon change. **Advanced Materials Research** 518:5112-5115.

Xin J (2024) Enhancing soil health to minimize cadmium accumulation in agro-products: the role of microorganisms, organic matter, and nutrients. **Environmental Pollution** 348: 123890.

Xu M, Liu W, Zhang Z, Wang X, Li Y, Wang J, Yang Y (2021) High microbial diversity stabilizes the responses of soil organic carbon decomposition to warming in the subsoil on the Tibetan Plateau. **Global Change Biology** 27(10):2061–2075.

Yusuf FR, Suprihatin S, Indrasti NS (2025) Improving the environmental performance of palm oil industry through the utilization of empty oil palm bunches as organic fertilizer and biochar for soil amendment. **Environmental Challenges** 20:101185.

Zhang H, Liu W, Xiong Y, Li G, Cui J, Zhao C, Zhang L (2024) Effects of dissolved organic matter on distribution characteristics of heavy metals and their interactions with microorganisms in soil under long-term exogenous effects. **Science of The Total Environment** 947:174565.

Zhang RT, Wang SZ, Zhong HX, Liu YN (2025) Seasonal variations in the soil microbiota of a temperate wetland in Northeast China in response to nitrogen deposition. **Catena** 250:108794.

Zhao LB, Tang ZX, Zhai HF, Lai HY, Li HY, Liu S, Liao XD, Xing SC (2025) Organic fertilizer mitigated the oxidative stress of tomato induced by nanoplastics through affecting rhizosphere soil microorganisms and bacteriophage functions. **Journal of Hazardous Materials** 492:138301.

Zhu L X, Zhang F L, Li L L, Liu T X (2021) Soil C and aggregate stability were promoted by bio- fertilizer on the North China Plain. **Soil Science and Plant Nutrition** 21:2355–2363.