

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO ASSOCIADO A
PLANTAS DE COBERTURA INCREMENTA A SAÚDE DO
SOLO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA SOB PLANTIO
DIRETO NO CERRADO**

Philippe Solano Toledo Silva

Engenheiro Agrônomo

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO ASSOCIADO A
PLANTAS DE COBERTURA INCREMENTA A SAÚDE DO
SOLO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA SOB PLANTIO
DIRETO NO CERRADO**

Philippe Solano Toledo Silva

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Tese apresentada à
Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias –
Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do
título de Doutor em Agronomia
(Ciência do Solo).

S586c

Silva, Philippe Solano Toledo

Composto de lodo de esgoto associado a plantas de cobertura incrementa a saúde do solo e a produtividade de soja sob plantio direto no cerrado / Philippe Solano Toledo Silva. -- Jaboticabal, 2025
118 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira

1. Agricultura sustentável. 2. Fertilizantes. 3. Plantas e solo. I.
Título.

Impacto potencial dessa pesquisa

O fertilizante orgânico composto produzido a base de lodo de esgoto, pode contribuir para a redução do aporte de fertilizantes minerais, promovendo maior rentabilidade econômica e destino sustentável para este resíduo. Os índices de saúde do solo podem auxiliar na tomada de decisão dos manejos agrícolas dos sistemas de cultivo praticados na região do Cerrado.

Potential impact of this research

Composted organic fertilizer based on sewage sludge can reduce the input of mineral fertilizers, promoting greater economic profitability and a sustainable destination for this waste. Soil health index can be a valuable tool for making informed decisions in agricultural systems practiced in the Cerrado region.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA INCREMENTA A SAÚDE DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA SOB PLANTIO DIRETO NO CERRADO

AUTOR: PHILIPPE SOLANO TOLEDO SILVA

ORIENTADOR: THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 07/05/2025 19:31:19-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciencia do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. MÁRCIO RENATO NUNES (Participação Virtual)
Department of Soil, Water and Ecosystem Sciences / University of Florida (UF) - Gainesville/Flórida/EUA

Documento assinado digitalmente
 MAURICIO ROBERTO CHERUBIN
Data: 12/05/2025 11:52:07-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / ESALQ USP Piracicaba/SP

Documento assinado digitalmente
 LETUSA MOMESSO MARQUES
Data: 13/05/2025 16:03:07-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. LETUSA MOMESSO MARQUES (Participação Virtual)
Departamento de Agricultura / Universidade Federal de Goiás (UFG) - Goiânia /GO

Documento assinado digitalmente
 MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 13/05/2025 16:56:07-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade / FEIS UNESP Ilha Solteira

Jaboticabal, 06 de maio de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Philippe Solano Toledo Silva – Filho de Aparecido Vieira da Silva e Maria Aparecida Toledo Silva. Nasceu no município de Ilha Solteira – SP em 21 de maio de 1991. cursou Engenharia Agrônoma na Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Câmpus de Ilha Solteira, onde obteve em 2018, o título de Engenheiro Agrônomo. Durante a graduação, foi bolsista PIBIC/CNPq, participando e desenvolvendo projetos voltados à recuperação de áreas degradadas e microbiologia agrícola. Em abril de 2021, obteve o título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Horticultura), na Universidade Estadual Paulista – Câmpus de Botucatu, sob orientação do Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes. Em agosto de 2021, iniciou o curso de Doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do solo) na Universidade Estadual Paulista – Câmpus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira. Durante o doutorado, participou de projetos relacionados ao uso de plantas de cobertura associadas à aplicação de fertilizantes e seus impactos na saúde do solo. No ano de 2023, realizou estágio (doutorado sanduíche) no Centre de Coopération Internationale en Recherche (CIRAD), Montpellier, França, no qual participou de projetos nas áreas de biologia molecular e macrofauna do solo.

Epígrafe

“Carry on, my wayward son
There will be peace when you are done
Lay your weary head to rest
Don't cry no more”
(Kansas)

Dedicatória

Aos meu queridos pais por todo amor, carinho, apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus queridos pais, pelo carinho, confiança, apoio e amor incondicional.

À Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal e Câmpus de Ilha Solteira, pela oportunidade oferecida por meio do curso de pós-graduação, contribuindo para o aprimoramento da minha formação profissional e científica.

Expresso meus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela concessão das bolsas de apoio à pesquisa, modalidades doutorado e doutorado sanduíche.

À Fundação Agrisus, pelo apoio financeiro (PA 3228/22) concedido ao nosso projeto de pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, minha sincera gratidão pelo aceite na pesquisa, pelo apoio, confiança e pela dedicação ao longo desses anos de doutorado. Agradeço profundamente pelos valiosos ensinamentos e conselhos que foram fundamentais para o meu crescimento profissional e pessoal.

A todos os membros do Grupo de Estudos em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), especialmente a Raimunda Eliane, Nathércia Castro, Luana Corrêa e Rodrigo Alves, pelo apoio essencial ao desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os colaboradores da Fazenda Pesquisa e Extensão (FEPE), Câmpus de Ilha Solteira, pelo apoio durante a realização deste trabalho. Em especial, agradeço aos servidores César, Polaco, Cícero, Alvino, Junior e Wesley, pelo comprometimento e contribuições de cada um de vocês.

Aos Laboratórios de Fertilidade e Física do Solo da Unesp-Ilha Solteira, pela realização das análises laboratoriais. Agradeço pelo excelente trabalho dos técnicos Diego, Carlos e Silvia.

Aos Laboratórios de Microbiologia e Matéria Orgânica do Solo da ESALQ/USP-Piracicaba, pela realização das análises laboratoriais e pelo

excelente trabalho das técnicas Denise e Eleusa. Agradeço, também, à Mayra Rodrigues, pelo apoio nas análises laboratoriais.

Aos parceiros e colaboradores, Prof. Dr. Maurício Roberto Cherubin, Prof. Dr. Márcio Renato Nunes, Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, Profa. Dra. Jussara Borges Regitano e Profa. Dra. Letusa Momesso Marques, pelas contribuições na pesquisa, no exame geral de qualificação e na defesa da tese.

Ao Centre de Coopération Internationale en Recherche (CIRAD) – Unidade Eco&Sols, pela recepção e pelo fornecimento de toda a infraestrutura necessária para o meu período de formação na França.

Aos meus supervisores do CIRAD, Dra. Ágnes Robin e Dr. Mickael Hedde, pela confiança, oportunidade e pelos conhecimentos compartilhados durante o período do doutorado sanduíche.

Aos técnicos de laboratório do CIRAD, Cyril Versavel, Evelyne Seguret e, especialmente, a Damien Dezette, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante meu estágio na França.

Aos amigos e amigas, Patrick Ferreira, Aline Marchetti, Adrielle Rodrigues, Maria Luana, Thays Couto, pelo apoio e amizade.

Aos amigos e amigas do CIRAD – Eco&Sols, Sylvan Gérard, Marcel Nahim, Chao Fei, Pan Yin, Arthur Cousson, Josiana Babilio, Adam Rodrigues, Jon Zubieta e, em especial, Vitória Barbosa e Vitória Leão, por me acolherem e compartilharem momentos que levarei para sempre comigo.

As minhas ‘roomates’ Camille Eslan e Juliette Defossez, pelos conselhos, paciência, amizade, acolhimento e confiança.

A todos e todas que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho, muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais.....	1
1 Introdução	1
2 Revisão de literatura	3
Referências	13
CAPÍTULO 2 – Fertilizante orgânico associado a plantas de cobertura incrementam indicadores de qualidade do solo sob plantio direto no Cerrado	24
RESUMO.....	24
ABSTRACT	25
1. Introdução	26
2. Material e métodos.....	28
3. Resultados	37
4. Discussão.....	47
5. Conclusões.....	56
Referências	58
CAPÍTULO 3 – Impacto do uso de fertilizante orgânico e culturas de cobertura na saúde do solo e na produtividade de grãos de soja em condições tropicais.	
.....	64
1. Introdução	66
2. Material e métodos.....	68
3. Resultados	77
4. Discussão.....	85
5. Conclusões.....	90
REFERENCIAS.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).	32
Tabela 2. Atributos químicos ⁽¹⁾ e físicos ⁽²⁾ das amostras de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico utilizados no experimento (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).	33
Tabela 3. Efeito dos tratamentos nos indicadores físicos do solo (MAP: Macroporosidade do solo MIP: Microporosidade do solo; PT: Porosidade total do solo; DS: Densidade do solo; RSP: Resistência do solo a penetração), nas profundidades de 0–0,1 e 0,1–0,2 m ($n = 4$).	38
Tabela 4. Efeito dos tratamentos nos indicadores químicos do solo P, K, Zn pH e capacidade de troca de cátions (CTC) nas profundidades de 0–0,1 e 0,1–0,2 m ($n = 4$).	41
Tabela 5. Efeito dos tratamentos sobre os indicadores biológicos do solo: Taxa respiratória do solo (C-CO ₂), C-Biomassa microbiana (MBC), C Total, N Total, C/N Total, atividade enzimática da arilsulfatase, β -glucosidase, Fosfatase Ácida e teor de glomalina facilmente extraível do solo (EEG) nas profundidades de 0–0,1 e 0,1–0,2 m ($n = 4$).	43
Tabela 6. Efeito dos tratamentos sobre a biomassa seca de plantas de cobertura e produtividade de soja ($n = 4$).	45
Tabela 7. Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).	72
Tabela 8. Atributos químicos (1) e físicos (2) das amostras de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico utilizados no experimento (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).	73
Tabela 9. Efeito dos tratamentos nos indicadores de saúde do solo – físico: densidade do solo (DS), químicos: pH, P, K e biológicos: β -glucosidase (β G), C total (CT) e C da biomassa microbiana (MBC), nas profundidades de 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2).	78
Tabela 10. Pontuações (de 0 a 1) dos indicadores de saúde do solo – físico: densidade do solo (DS), químicos: pH, P, K e biológicos: β -glucosidase (β G), C total (CT) e C da biomassa microbiana (MBC) avaliados nas profundidades 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2).	80

Tabela 11. Índices de saúde do solo (“Soil Health Index” – SHI) para as profundidades 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2). SHI-F: físico, SHI-Q: químico e SHI-B: biológico..... 82

Tabela 12. Cargas fatoriais para a análise de componentes principais para a produtividade de soja e índices de saúde do solo. SHI-F: Índice de saúde física, SHI-Q: Índice de saúde química, SHI-B: Índice de saúde biológica, Soja: Produtividade de grãos. 83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Alguns benefícios das plantas de cobertura nas propriedades do solo.	4
Figura 2. Evolução da importação mensal de fertilizantes minerais no Brasil. Fonte: Conab, 2024.....	7
Figura 3. Produção científica de artigos, revisões e capítulos de livros sobre o tema ‘saúde do solo’ na plataforma Scopus entre 2015 a janeiro de 2025.	10
Figura 4. Etapas para a elaboração do índice de saúde do solo. Fonte: Adaptado de Andrews; Karlen; Cambardella, 2004.....	13
Figura 5. Área experimental localizada no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil.....	28
Figura 6. Temperatura mínima, média e máxima (°C) e precipitação pluvial (mm) ao longo do período experimental. Fonte: Sistema de Monitoramento Climático da UNESP, Campus de Ilha Solteira.	29
Figura 7. Cultivos (C) e manejos da adubação mineral e orgânica para cada ano agrícola estudado. FM: Fertilizantes minerais fontes de N, P, K, B e Zn. CLE: fertilizante orgânico a base de composto de lodo de esgoto (CLE), aplicado nas doses de 5 e 10 t ha ⁻¹ (base úmida). As doses de CLE foram estabelecidas conforme recomendações técnicas do fornecedor do fertilizante orgânico (Empresa Tera Ambiental). Planta de cobertura “mix”: nabo forrageiro, crotalária e milheto. Anos agrícolas: I = 2017/18, II = 2018/19, III = 2019/20, IV = 2020/21, V = 2021/22 e VI = 2022/23.....	30
Figura 8. Respostas entre cultivos e manejos de adubação para (a) MAP 0–0,1 m; (b) MAP 0,1–0,2 m; (c) MIP 0–0,1 m; (d) PT 0–0,1 m; (e) PT 0,1–0,2 m; (f) DS 0–0,1 m; (g) RSP 0–0,1 m; (h) RSP 0,1–0,2 m. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para maneios de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim- marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). MAP = Macroporosidade do solo, MIP = Microporosidade do solo, PT = Porosidade total do solo, DS = densidade do solo, RSP = Resistência do solo a penetração. C = Controle, MF = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE =	

Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b). 39

Figura 9. Resposta entre cultivos e manejos de adubação para os teores de Zn no solo na profundidade de 0,0–0,1 m. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, FM = Fertilização mineral – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b). 42

Figura 10. Interações entre cultivos e manejos de adubação para (a) C-CO₂ 0,1–0,2 m; (b) MBC 0–0,1 m; (c) MBC 0,1–0,2 m; (d) Arylsulfatase 0,1–0,2 m; (e) Fosfatase Ácida 0,1–0,2 m; (f) EEG 0–0,1 m; (g) EEG 0,1–0,2 m. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, FM = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b). 44

Figura 11. Interações entre cultivos e manejos de adubação para a produtividade de grãos de Soja. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, MF = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses

acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b)..... 46

Figura 12. Correlação de Pearson entre os indicadores e produtividade de soja na profundidade de 0–0,1 m (a) e 0,1–0,2 m (b). Indicadores físicos: MAP (Macroporosidade do solo), MIP (Microporosidade do solo), PT (Porosidade total do solo), DS (Densidade do solo), RP (Resistencia do solo a penetração). Indicadores químicos: P (Fósforo), K (Potássio), Zn (Zinco), CTC (Capacidade de troca de cátions) e pH. Indicadores biológicos: MBC (Caborno da biomassa microbiana), AM (Atividade microbiana), EEG (Glomalina facilmente extraível), CT (Carbono total), NT (Nitrogênio total), CNT: Relação C/N total, AS: Arylsulfatase, BG: β -glucosidase, FA: Fosfase Ácida. PROD: Produtividade de grãos de soja. Cor azul indica correlação positiva e vermelho indica correlação negativa..... 47

Figura 13. Área experimental localizada no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil..... 68

Figura 14. Área experimental localizada no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil..... 69

Figura 15. Tratamentos aplicados e cultivos realizados aos longo de seis anos de experimentação. FM: Fertilizantes minerais fontes de N, P, K, B e Zn. FO: fertilizante orgânico a base de composto de lodo de esgoto, aplicado nas doses de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida). As doses de CLE foram estabelecidas conforme recomendações técnicas do fornecedor do fertilizante orgânico (empresa Tera Ambiental). Planta de cobertura “mix”: nabo forrageiro, crotalária e milho... 70

Figura 16. Respostas entre cultivos e manejos de adubação para a densidade do solo (DS) 0–0,1 m (a) e o carbono da biomassa microbiana (MBC) nas profundidades 0–0,1 m (b) e 0,1–0,2 m (c). Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz/feijão/milho/soja + “mix” de nabo forrageiro, crotalária e milho/soja. C = Controle, FM = Fertilizantes minerais– aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante

orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020). 79

Figura 17. Respostas entre cultivos e manejos de adubação os scores de P 0–0,1 m (a), P 0,1–0,2 m (b) e carbono da biomassa microbiana (MBC) 0,1–0,2 m (c). Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). DS = Densidade do solo, MBC = Carbono da biomassa microbiana. C = Controle, FM = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020). 81

Figura 18. Respostas entre cultivos e manejos de adubação para os índices de saúde do solo SHI-Q 0–0,1 m (a), SHI-Q 0,1–0,2 m (b) e SHI-B 0,1–0,2 m (c). Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, FM = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020). 82

Figura 19. Análise de componentes principais entre índices de saúde do solo (SHI) e produtividade de grãos de soja nas profundidades de 0–0,1 m (a) e 0,1–0,2 m (b) e correlação de Pearson entre os SHI e produtividade de grãos de soja nas profundidades de 0–0,1 m (d) e 0,1–0,2 m (e). 84

Figura 20. Esquema gráfico para os índices de saúde do solo no ano IV e ano V, em função dos manejos de adubação nas profundidades de 0–0,1 m (a) e 0,1–0,2 m (b). 84

COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA INCREMENTA A SAÚDE DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DE SOJA SOB PLANTIO DIRETO NO CERRADO

RESUMO – A adubação orgânica associada às práticas conservacionistas pode manter ou aumentar a saúde do solo e incrementar a produtividade das culturas. No presente estudo, buscou-se avaliar os efeitos do fornecimento de fertilizante orgânico (*i.e.*, composto de lodo de esgoto – CLE) ou mineral associado ao cultivo de plantas de cobertura (*i.e.*, capim-marandu ou ‘mix’ de *crotalária juncea*+milheto+nabo forrageiro) na saúde do solo e na produtividade de grãos de soja. Para tal, um experimento de campo foi realizado ao longo de seis anos no Cerrado brasileiro, usando um delineamento de blocos casualizados com oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial, sendo: dois sistemas de cultivo/rotação (I. soja/milho/capim-marandu/feijão-comum/aveia/trigo e II. arroz/feijão/capim-marandu/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto) e quatro tipos de adubação (*i* = sem CLE e fertilizantes minerais, *ii* = sem CLE e com fertilizante mineral convencional, *iii* = fornecimento de 5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) e *iv* = fornecimento de 10 t ha⁻¹ de CLE (base úmida). Para monitorar a saúde do solo foram avaliados em duas profundidades (0,0–0,1 e 0,1–0,2 m) os indicadores físicos (macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e resistência do solo a penetração), químicos (P, K, Zn, pH e CTC) e biológicos do solo (taxa respiratória do solo – C-CO₂, C-Biomassa microbiana, C total, N total, C/N total, atividade enzimática – arylsulfatase, β-glucosidase, fosfatase ácida e glomalina facilmente extraível). Utilizou-se, também, a ferramenta de avaliação dinâmica *Soil Management Assessment Framework –SMAF*, onde, os indicadores densidade do solo, pH, P, K, β-glucosidase, C total, C-Biomassa microbiana foram convertidos em índices de saúde do solo (SHI) e correlacionados com a produtividade de soja. Em comparação ao tratamento controle, o residual de três aplicações de 10 t ha⁻¹ de CLE, especialmente combinado com o ‘mix’ de plantas de cobertura, incrementou a macro e porosidade total do solo, pH, P, K, Zn, CTC e C total nas duas profundidades e, atividade da arylsulfatase e β-glucosidase e teor de glomalina facilmente extraível na profundidade de 0–0,1 m. Em comparação ao tratamento controle, o cultivo ‘mix’ combinado com o residual de três aplicações de 5 t ha⁻¹ de CLE incrementou a produtividade de grãos de soja em 29%. O índice químico (SHI-Q) se correlacionou positivamente com a produtividade de soja nas duas profundidades e negativamente com o índice biológico (SHI-B). O SHI-B respondeu positivamente a combinação do ‘mix’ com o residual de três aplicações de 10 t ha⁻¹ de CLE, aumentando do ano IV para o ano V. Os resultados evidenciam a importância das plantas de cobertura associadas à adubação orgânica na promoção de cultivos sustentáveis em agroecossistemas tropicais.

Palavras-chave: Agricultura sustentável, Economia circular, Fertilizantes, *Glycine max* L., Qualidade do solo, Segurança alimentar.

COMPOSTED SEWAGE SLUDGE ASSOCIATED WITH COVER CROPS ENHANCES SOIL HEALTH AND SOYBEAN YIELD UNDER NO-TILL IN THE CERRADO

ABSTRACT – The organic fertilizer associated with conservative practices may improve soil health and increase crop productivity. This study aimed to evaluate the effects of providing organic (*i.e.*, composted of sewage sludge – CSS) or mineral fertilizer combined with cover crops management (*i.e.*, marandu grass or *crotalaria juncea* + millet + forage radish mix) on soil health and soybean yield. A field experiment was carried out in the Brazilian Cerrado for six crop year using a randomized complete block design with eight treatments and four replications. The treatments were arranged in a factorial scheme, with two cropping systems/rotation (I. soybean/maize/marandu grass/common beans/peas/oats/wheat) and II. rice/bean/marandu grass/maize/soybean + mix of forage radish, *crotalaria juncea* and millet) and four types of fertilization (*i* = no fertilization with CSS and mineral fertilizers, *ii* = no fertilization with CSS and conventional mineral fertilization, *iii* = supply of 5 Mg ha⁻¹ of CSS (wet basis) and *iv* = supply of 10 Mg ha⁻¹ of CSS (wet basis). To assess soil health, the following were evaluated at two depths (0–0.1 and 0.1–0.2 m) physical indicators (macroporosity, microporosity, total porosity, soil bulk density, and resistance to penetration), chemical indicators (P, K, Zn, pH, and CTC), and biological indicators (soil respiration rate – C-CO₂, C-microbial biomass, total C, total N, total C/N, enzyme activity such as arylsulfatase, β-glucosidase, acid phosphatase, and easily extractable soil glomalin). The dynamic assessment tool *Soil Management Assessment Framework-SMAF* was also used, where the indicators soil bulk density, pH, P, K, β-glucosidase, Total C, C-microbial biomass were converted into Soil Health Index (SHI) and correlated with soybean yield. When compared to the control treatment, the residual of three applications of 10 Mg ha⁻¹ of CSS, especially when combined with the ‘mix’ of cover crops, increased the soil's macro and total porosity, pH, P, K, Zn, CTC, and total C for both depths and the activity of arylsulfatase and β-glucosidase and the content of easily extractable glomalin in the 0–0.1 m depth. When compared to the control treatment, mix cultivation combined with the residual of three applications of 5 t ha⁻¹ CSS increased soybean grain productivity by 29%. The soil chemical index (SHI-Q) correlated positively with soybean productivity at both depths and negatively with the soil biological index (SHI-B). The SHI-B responded positively to the combination of the mix and the residual of three applications of 10 Mg ha⁻¹ of CSS, increasing from year IV to year V. The results show the importance of cover crops associated with organic fertilization in promoting sustainable crops in tropical agroecosystems.

Keywords: Sustainable agriculture, Circular economy, Fertilizers, *Glycine max* L., Soil quality, Food security.

LISTA DE ABREVIATURAS

CLE	Composto de lodo de esgoto
CT	Carbono total
DS	Densidade do solo
EEG	Glomalina facilmente extraível
MBC	Carbono da biomassa microbiana
MF	Adubação mineral convencional
MAP	Macroporosidade do solo
MIP	Microporosidade do solo
NT	Nitrogênio total
PT	Porosidade total do solo
RSP	Resistência do solo a penetração
SPD	Sistema plantio direto

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1 INTRODUÇÃO

Os solos fornecem vários serviços ecossistêmicos essenciais para a vida humana, como o fornecimento de alimentos, fibras e energia, sequestro de C e purificação de água (Baveye et al., 2020; Jayaramaiah et al., 2025; Zhang et al., 2025). Em decorrência da evolução dos estudos a respeito dos serviços ecossistêmicos, o conceito de saúde do solo (SS) foi ampliado, incorporando tanto aspectos ambientais quanto humanos (Bhattacharya et al., 2024). Desta forma, foi possível estabelecer conexões e objetivos mais amplos de sustentabilidade, visando enfrentar desafios globais, como a insegurança alimentar e as mudanças climáticas.

A pesquisa brasileira sobre saúde do solo (SS) avançou muito nos últimos anos. No entanto, ainda há necessidade de maior divulgação e aplicação prática em diferentes solos, condições climáticas e manejos agrícolas (Silva; Araújo; Cardoso, 2023). Desta forma, o desenvolvimento de metodologias padronizadas para quantificar e monitorar a SS, levando em consideração diferentes condições de campo, ainda pode representar um grande desafio. Logo, a aplicação prática destes estudos permitiria compreender e elucidar quais medidas seriam necessárias para a manutenção ou recuperação de solos, de acordo com suas especificidades (Chang et al., 2022).

Os primeiros estudos sobre integração e interpretação conjunta de indicadores de SS, iniciaram com a caracterização da biomassa e atividade microbiana em solos de Cerrado sob vegetação nativa e sob diferentes sistemas de manejo (Mendes et al., 2009). A evolução destes estudos permitiu o desenvolvimento da tecnologia BioAS, uma ferramenta que integra indicadores químicos e biológicos na análise laboratorial rotineira, permitindo um diagnóstico mais preciso acerca do manejo empregado (Mendes et al., 2021). Contudo, considerando-se todas as propriedades e funções do solo, uma abordagem que envolva indicadores químicos, físicos e biológicos, poderia elucidar de forma mais criteriosa as mudanças de uso da terra.

O desenvolvimento de avaliações dinâmicas que englobam os aspectos químicos, físicos e biológicos do solo, possibilitou a criação de diversas

ferramentas, dentre elas a “*Soil Management Assessment Framework*” (SMAF) (Chang et al., 2022; Jimenez et al., 2022). O SMAF possibilita a atualização e o aprimoramento das interpretações para variados tipos de solo, clima e práticas de manejo. Assim, as curvas de pontuação geradas podem ser utilizadas e interpretadas considerando diferentes fatores como textura, clima, declividade do terreno, mineralogia, classe de intemperismo, além de diferentes manejos que podem beneficiar a SS, com a agricultura regenerativa (Nunes et al., 2021; Beacham et al., 2023).

Os benefícios do uso de plantas de cobertura já são amplamente difundidos e recomendáveis para o cultivo em condições tropicais (Khangura et al., 2023 Mamabolo; Pryke; Gaigher, 2024). O uso de espécies solteiras ou combinadas na forma de mix, contribuem para melhorar os aspectos químicos por meio da ciclagem de nutrientes, os aspectos físicos, por meio de suas raízes que auxiliam na formação de poros e redução da compactação e os aspectos biológicos, como a interação com microrganismos do solo e fixação biológica (Junod et al., 2024; Moraes et al., 2024). Estes incrementos podem ser ainda maiores quando combinados a manejos de adubações, contudo, o Brasil ainda é dependente da importação de fertilizantes minerais para manter sua produtividade grãos (Farias et al., 2020).

As pesquisas voltadas para o uso de fontes alternativas de nutrientes na agricultura ganharam maior relevância no Brasil nos últimos anos, especialmente em função da sua dependência externa por fertilizantes minerais (Brasil, 2023). Adubos alternativos, como o composto de lodo de esgoto (CLE), um fertilizante orgânico rico em matéria orgânica, além de nutrientes como N, P e micronutrientes como Cu e Zn, podem ser uma alternativa sustentável ao uso de fertilizantes minerais (Silva et al., 2023). Contudo, ainda são incipientes pesquisas que avaliaram o impacto da adubação via CLE associado ao cultivo de plantas de coberturas na SS e na produtividade de grãos de soja.

No presente estudo, testou-se as seguintes hipóteses: *i)* o cultivo de plantas de cobertura associado às aplicações de CLE em solo de Cerrado suprem a demanda nutricional e aumentam o desenvolvimento das culturas agrícolas sob SPD, melhorando o solo de modo similar ou acima do observado apenas com o fornecimento de fertilizantes minerais e *ii)* os sistemas de cultivo

conservacionistas melhoram a qualidade do solo, no qual haverá maior descompactação, fixação biológica de N₂, maior ciclagem de nutrientes e aumento na produtividade de grãos de soja com o cultivo de crotalária juncea, nabo forrageiro e milho na forma de “mix” de plantas de cobertura utilizadas em comparação ao cultivo “solteiro” do capim-marandu (*U. brizantha*). Portanto, objetivou-se com este estudo, avaliar o efeito do cultivo de plantas de cobertura associado ao fornecimento de fertilizantes minerais ou orgânico (*i.e.*, CLE), monitorando a SS do solo por meio de índices gerados a partir de análises de indicadores químicos, físicos e biológicos do solo e a produtividade de soja cultivada sob SPD na região do Cerrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Uso de plantas de cobertura para uma produção sustentável

A agricultura moderna busca atender às necessidades atuais e futuras relacionadas ao crescimento populacional global e à produção sustentável de alimentos, reduzindo os impactos ambientais e promovendo a manutenção e preservação dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo (Machado; Rhoden, 2023; Tan; Kuebbing, 2023). A adoção de técnicas sustentáveis na agricultura pode aumentar o armazenamento de C, preservar a microbiota, melhorar a retenção hídrica, além de aprimorar a estrutura e a diversidade do solo. Entre as técnicas utilizadas, destacam-se o sistema de plantio direto (SPD) e a rotação de culturas (Fagundes et al., 2019).

Diversas culturas podem ser utilizadas em rotação, antecedendo e/ou entre o cultivo de grãos e, quando associada ao SPD, promovem melhorias no solo, em decorrência do acúmulo de resíduos vegetais que permanecem na sua superfície (Pissinatti et al., 2018) (Figura 1).

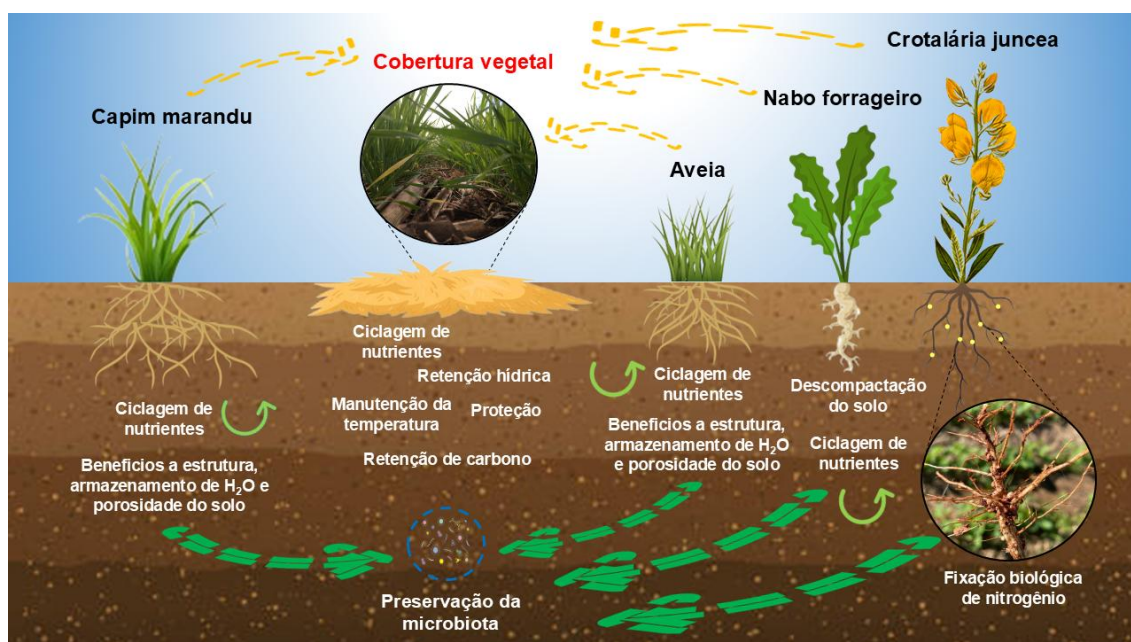


Figura 1. Alguns benefícios das plantas de cobertura nas propriedades do solo.

Quando uma cultura de maior interesse comercial é consorciada ou rotacionadas com gramíneas (e.g., braquiária: *Urochloa*, aveia: *Avena sativa*, milheto: *Pennisetum glaucum*), há aumento no sequestro de C, ciclagem de nutrientes e incrementos nos atributos microbiológicos do solo (Soussana; Lemaire, 2014; Coser et al., 2016; Oliveira et al., 2016).

Além das gramíneas, outras espécies podem ser escolhidas de acordo com a sua especialidade, como profundidade do seu sistema radicular, rusticidade, agressividade, elevada produção de biomassa seca, porcentagem de crescimento e cobertura do solo, resistência a patógenos e doenças, além da facilidade de manejo no campo (Wolschick et al., 2016).

A disponibilidade de plantas de cobertura, adaptadas a distintas condições agroclimáticas colaboram com a manutenção da biodiversidade e a diversificação de produtos agrícolas, com a diminuição dos custos, dos riscos ambientais, econômicos e a manutenção efetiva da sustentabilidade, em qualquer atividade agrícola (Daryanto et al., 2018; Adetunji et al., 2020).

Plantas de cobertura que fazem associação simbiótica com bactérias fixadoras de N₂ (Cavalcante et al., 2012), possuem boa produção de biomassa com rápida degradação, devido sua baixa relação C:N (Silva et al., 2021) são as

leguminosas (e.g., crotalaria: *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria mucronata* e *Crotalaria juncea*, feijão-guandu: *Cajanus cajan*, mucuna – *Mucuna deeringiana* e *Mucuna aterrima*, Tremoço branco: *Lupinus albus*). Contudo, somente o cultivo destas plantas na entressafra em SPD não é uma prática usual, pois não há muita formação de palha para a proteção do solo e semeadura da cultura que virá em sucessão (Pereira et al., 2017). Desta forma, recomenda-se sua utilização em consórcios com outras espécies, geralmente gramíneas. Além de gramíneas e leguminosas, outras espécies apresentam potencial para serem utilizadas em monocultivo ou consorciadas como plantas de cobertura. Estas podem atuar especificamente sobre algumas propriedades do solo, como a descompactação, pela ação de suas raízes, aumento da estabilidade de agregados (Jian et al., 2020) e taxa de infiltração de água em função do aumento da porosidade do solo (Franczikowski et al., 2019), além de promover a diversificação biológica (Chavarría et al., 2016).

O uso de crucíferas, como o nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) pode ser uma alternativa para diversificação de plantas de cobertura, por possuir um sistema radicular pivotante agressivo, que auxilia na ciclagem de nutrientes e na descompactação do solo em camadas iniciais (Debiasi et al., 2010; Michelon et al., 2019). Desta forma, a escolha do método de cultivo e espécies utilizadas como plantas de cobertura, deverá ser em função, principalmente, do papel que estas desempenham nos solos, fornecendo importantes informações para o estudo a respeito da saúde do solo e o efeito na produtividade de grãos, como a soja.

O Brasil configura-se como um dos maiores produtores mundiais de soja, desempenhando papel estratégico no cenário global. A oleaginosa possui elevada relevância para o agronegócio nacional, sendo amplamente empregada em segmentos diversos, como alimentação humana e animal, além da produção de biocombustíveis, especialmente o biodiesel (Conab, 2024). A produtividade da soja pode ser potencializada pela adoção de sistemas integrados de cultivo, envolvendo o uso de plantas de cobertura e a aplicação de fontes diversificadas de nutrientes.

2.2 Fertilizantes e fontes alternativas de nutrientes

Nas últimas décadas, o manejo de fertilizantes foi fundamental para o aumento expressivo da produção de alimentos em todo o mundo. Contudo, com o crescimento populacional iminente e outros desafios globais, como a interrupção das cadeias de suprimentos (devido à escassez de produtos), aumento no preço do gás natural (um dos principais componentes na fabricação de fertilizantes nitrogenados), embargos econômicos (e.g., União Europeia e Estados Unidos à Bielorrússia) e conflitos entre países (e.g., Ucrânia x Rússia), podem impactar a cadeia global de produção de alimentos (Abay et al., 2023; Arndt et al., 2023; Dillon; Barret, 2016; Headey; Alderman, 2019). Neste contexto, os países que dependem da importação desses insumos para manter sua produção agrícola podem ser severamente afetados.

O Brasil, um dos maiores produtores e exportadores de grãos do mundo, depende da importação de fertilizantes minerais para suprir a produção de alimentos no país (Nascimento et al., 2022; Conab, 2024). No caso específico do potássio (K), de grande relevância para a produção agrícola, a dependência do insumo importado chega a quase 96% (Bueno et al., 2023). De acordo com o representante do Ministério da Agricultura do presente governo, a dependência externa de fertilizantes tornou-se ainda mais preocupante devido às sanções contra a Belarus (ou Bielorrússia) em 2019 e contra a Rússia em 2022. Juntas, estas nações representavam aproximadamente 40% do que era importado pelo país para sua produção agrícola. Ainda, de acordo com o representante do ministério brasileiro responsável por este setor, essas sanções também contribuíram para o aumento nos custos de importação (Argenta et al., 2023; Agência Senado, 2022). Além disso, em um recente levantamento feito pela companhia nacional de abastecimento (Conab), é possível observar o aumento das importações de fertilizantes minerais ao longo dos anos (Conab, 2024) (Figura 2).

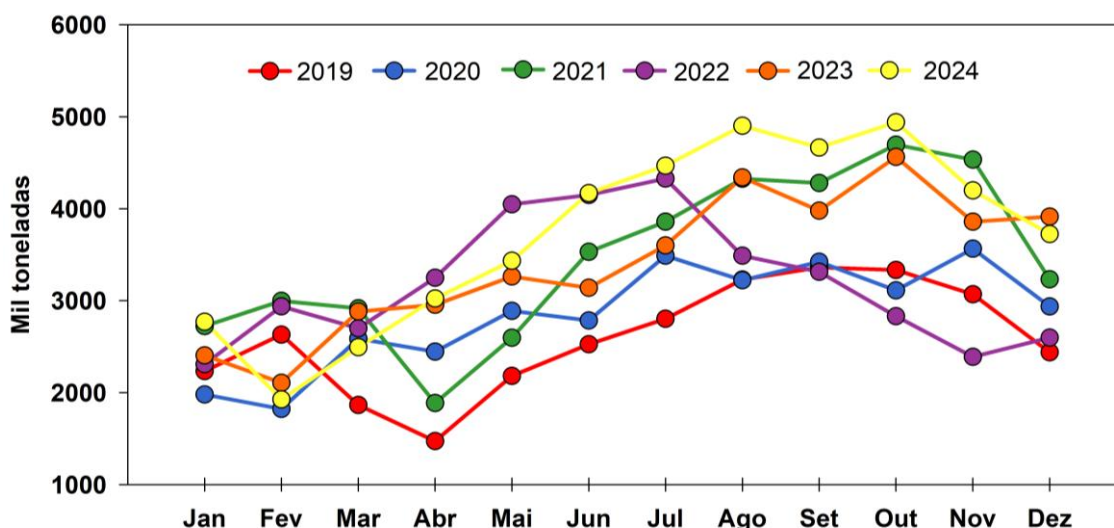


Figura 2. Evolução da importação mensal de fertilizantes minerais no Brasil. Fonte: Conab, 2024.

Esses dados não apenas evidenciam a dependência externa do Brasil em relação a estes insumos, mas também destacam a necessidade do desenvolvimento de estratégias e tecnologias sustentáveis para reduzir a mesma. Uma das alternativas encontradas pelos setores de agronegócio e economia, foi a criação do Plano Nacional de Fertilizantes (PNF). Este plano abrange tópicos importantes, como economia circular, novos produtos, tecnologias emergentes e fontes alternativas, incluindo o reaproveitamento de lodo de esgoto (LE) na agricultura (Silva et al., 2020; Brasil, 2023).

A melhoria no tratamento de esgotos, impulsionada pela crescente conscientização da sociedade civil e de órgãos ambientais, tem incentivado pesquisas voltadas para a destinação consciente do LE (Bittencourt; Aisse; Serrat, 2017). Este é um resíduo semissólido proveniente do tratamento dos esgotos ou águas residuárias, no qual a sua composição pode variar em função de sua origem e tratamento (Silva Guimarães; Cordeiro; Ferreira Rosa, 2018; Pedrosa et al., 2019). Muitas vezes, o descarte do LE não é feito de maneira adequada, devido a diversas questões, como a complexidade e o alto custo do processo (D'avila et al., 2019). No entanto, devido à grande quantidade de nutrientes em sua composição, o uso do LE pode ser viável na agricultura. Esse resíduo pode substituir, ainda que parcialmente, os fertilizantes minerais, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo e melhorando suas

características físicas e biológicas (Dahiya; Singh; Singh, 2022). Embora o LE ofereça benefícios diretos ao solo e às culturas agrícolas, pode conter contaminantes, como metais pesados, compostos orgânicos e agentes patogênicos (Uddin et al., 2025). No entanto, por meio da Resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que regulamenta a produção e aplicação de resíduos semissólidos em solos, foram definidos métodos de tratamento do LE com o objetivo de reduzir potenciais riscos prejudiciais a pessoas, animais e ao meio ambiente (Brasil, 2020). Um destes métodos é a compostagem, que consiste em um processo de decomposição microbiana sob condições que favoreçam a liberação de calor para a eliminação de possíveis patógenos. Esta técnica ainda contribui para reduzir a contaminação de solos agrícolas, visto que a compostagem altera a mobilidade dos metais pesados, limitando sua solubilidade e o seu potencial biodisponível (Nogueira et al., 2007; He; Tian; Lian, 2009).

Caso atenda aos critérios estabelecidos (*i.e.*, ausência de patógenos e contaminantes inorgânicos) na Instrução normativa nº 61 de 8 de julho de 2020, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o composto de lodo de esgoto (CLE) pode ser registrado como fertilizante orgânico Classe B (Brasil, 2020). Estudos recentes já comprovaram a viabilidade do uso do CLE como fertilizante orgânico (Afáz et al., 2017; Pedrosa et al., 2018; Jakubus; Banikowska, 2018; Prates, 2020; Prates et al., 2020). Sua utilização como fertilizante orgânico além de melhorar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, pode prevenir a contaminação e a degradação dos recursos hídricos (Jakubus; Graczyk, 2020). Quando aplicado em doses recomendadas em áreas agrícolas ou florestais, além de aumentar o aporte de matéria orgânica no solo, o CLE pode fornecer grandes quantidades de nitrogênio (N) e fósforo (P), além de micronutrientes como ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn), reduzindo os custos de produção devido à menor utilização de fertilizantes minerais (Jakubus; Bakinowska, 2018; Prates et al., 2020), o que pode ser particularmente benéfico para a região do Cerrado brasileiro, que é caracterizada por solos de baixa fertilidade natural, elevada acidez e baixo teor de MO e nutrientes. Embora essa região seja responsável por aproximadamente 60% da produção nacional de alimentos no país, há a necessidade de uso contínuo de

materiais corretivos de acidez e fertilizantes minerais para manter as elevadas produtividades (Pires, 2020). Nesse sentido, o CLE pode ser utilizado para complementar a adubação mineral, aumentando a eficiência das fontes minerais.

Portanto, fica evidente que a adoção dessa tecnologia além de permitir a redução da demanda por fertilizantes minerais – algo que atualmente está preocupando o setor agrícola devido aos elevados custos e dificuldade na aquisição (Ogino et al., 2021), contribui para manter a segurança alimentar no Brasil e no mundo. Em um estudo conduzido em condições tropicais, notou-se que a utilização do CLE como fertilizante orgânico, tem potencial para reduzir a necessidade do uso de fertilizantes minerais (Silva et al., 2024). Estes mesmos autores, verificaram que aplicação de 5 t ha⁻¹ de CLE em área cultivada com cana-de-açúcar, houve incremento de alguns atributos do solo (matéria orgânica do solo, pH, soma de bases, CTC e V), além de aumentar os teores disponíveis de P, K, Ca, Mg, B, Cu e Zn no solo. As culturas de grãos também podem se beneficiar do uso do CLE. Oliveira et al (2023) relatam ganhos nutricionais no cultivo de feijão-comum, no qual o efeito residual da aplicação de 7,5 e 10 t ha⁻¹, mantiveram os níveis de nutrientes adequados ao desenvolvimento da cultura na região. Logo, em uma agricultura moderna, que visa altas produtividades com sustentabilidade, torna-se fundamental o monitoramento da SS, permitindo que esse recurso natural não renovável possa sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e humana.

2.3 Uso da ferramenta SMAF para avaliar a saúde do solo

A saúde do solo (SS) pode ser definida como a capacidade deste de funcionar dentro dos limites do ecossistema natural ou gerenciado, sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e apoiar a saúde e habitação humana (Karlen et al., 1997; Lehmann et al., 2020). Solos saudáveis não apenas fornecem um ambiente de cultivo adequado para as plantas, mas também importantes serviços ecossistêmicos (Adhikari; Hartemink, 2016; Bunemann et al., 2018). Este conceito (ainda em evolução), abrange não somente aspectos ambientais como também aspectos relacionados à saúde humana, alinhando-se com objetivos de sustentabilidade mais amplos

para enfrentar desafios globais, incluindo insegurança alimentar e mudanças climáticas (Brevik; Burgess, 2014, Kopittke et al., 2023; Romano; Zelikoff, 2024).

Recentemente, a pesquisa brasileira tem ganhado destaque e contribuindo significativamente com as discussões sobre a SS. Em uma revisão de Cherubin, Carvalho e Rodrigues (2023), os autores destacaram que, das 23.439 publicações sobre 'Saúde do solo' ou 'Qualidade do solo' encontradas no Scopus, 49% foram publicadas entre 2018 e 2022, e 7% dessas publicações são de artigos de cientistas brasileiros. Porém, ao associar os termos 'Lodo de esgoto' e 'Condições tropicais' na busca, nota-se uma redução nas publicações (Figura 3), evidenciando a falta de estudos de longo prazo sobre os impactos desses manejos no solo e na produtividade de grãos para estas condições.

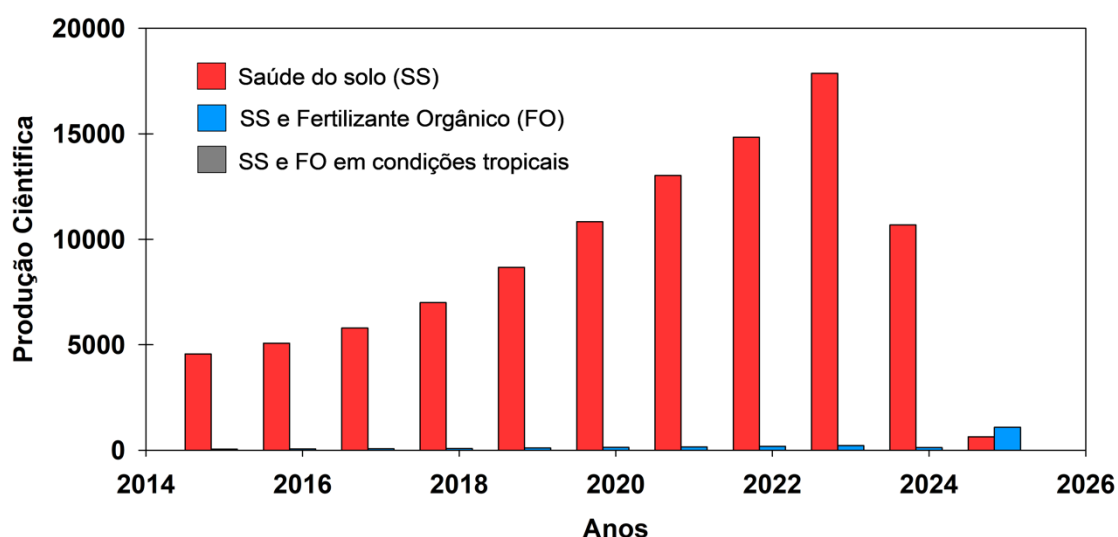


Figura 3. Produção científica de artigos, revisões e capítulos de livros sobre o tema 'saúde do solo' na plataforma Scopus entre 2015 a janeiro de 2025.

É importante destacar que, ao pesquisar o termo 'composto', não foram encontrados estudos sobre SS na plataforma Scopus durante o período estabelecido. Essa lacuna científica destaca a necessidade de novas pesquisas e do desenvolvimento de metodologias para avaliar os efeitos desses manejos na SS nesta região. Tais avaliações podem fornecer informações valiosas para entender os limites do solo e as ações necessárias para sua manutenção ou recuperação (Doran; Parkin, 1994; Cardoso et al., 2013; Silva et al., 2021; Chaudhry et al., 2024). Assim, a análise deve considerar tanto a qualidade ambiental quanto a sustentabilidade agrônômica, utilizando indicadores que

permitam avaliar os impactos dos diferentes sistemas de manejo do solo (Freitas et al., 2017; Bueno et al., 2018). Atualmente, esses indicadores são separados em indicadores químicos (IQ), físicos (IF) e biológicos (IB).

Os IQ auxiliam no monitoramento a respeito do comportamento do solo em relação a troca de cátions, armazenamento e necessidade nutricional das plantas, sendo o pH, a capacidade de troca de cátions (CTC) e os nutrientes de planta como o P e K são utilizados como parâmetros avaliadores (Hermiyanto; Winarso, Kusumandaru; 2016; Levi et al., 2021). Já os IF estabelecem relações com processos hidrológicos como taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem, porosidade e armazenamento de água (Cherubin et al., 2015; Sattolo et al., 2021). Em relação a densidade e resistência a penetração, é possível verificar o quanto um solo pode estar compactado e a partir destes indicadores manejá-lo adequadamente (Reichert et al., 2021).

Em relação aos IB, estes são considerados mais sensíveis que os indicadores químicos e físicos, por se tratar da parte viva e ativa da MO, atuando em processos bioquímicos no solo. Capazes de detectar com antecedência possíveis alterações ou distúrbios em função do seu uso e manejo, análises como a taxa respiratória do solo, avaliada por meio da quantificação do carbono do CO₂ (C-CO₂) liberado por microrganismos (Dadalto et al., 2015), o C da biomassa microbiana (MBC) que é a parte viva mais ativa da MO do solo, constituída principalmente por fungos, bactérias e actinomicetos (Mazetto et al., 2016), enzimas associadas ao ciclo do carbono (β -Glucosidase) e do enxofre (arilsulfatase) (Mendes et al., 2021), além do C orgânico total do solo (He et al., 2021), podem ser utilizadas como parâmetros para avaliadores deste componente do solo. Outro importante mecanismo de interação entre os microrganismos e as partículas do solo, que pode ser utilizado com um indicador sensível ao manejo é a produção de glicoproteínas por fungos micorrízicos arbusculares, que atuam na adesão das partículas dos agregados do solo, favorecendo trocas gasosas, infiltração de água, crescimento de raízes e estoque de C no solo (Ji et al., 2019).

Os indicadores podem ser utilizados para gerar índices que detectam mudanças na saúde do solo (Cherubin et al., 2021). Dessa forma, várias metodologias já foram desenvolvidas para auxiliar na compreensão dos

processos do solo e dos serviços ecossistêmicos a fim de promover a sustentabilidade (Bunemann et al., 2018). No Brasil, um grande avanço a respeito da interpretação e uso de indicadores para melhor compreensão sobre diferentes manejos e os seus impactos na saúde do solo, foi desenvolvida por Mendes et al (2021). Este estudo propôs a agregação de componentes biológicos (enzimas arilsulfatase e β -glucosidase, associadas aos ciclos do S e C, respectivamente) a análise química de rotina, preenchendo a lacuna deixada pela ausência do componente biológico nas análises do solo. De acordo com os autores, ao atuar nos processos de formação/decomposição da MO do solo, os componentes biológicos influenciam a estrutura do solo, com reflexos na dinâmica da água e nos processos que envolvem o sequestro/perda de C e a mitigação/emissão de gases do efeito estufa.

Para uma maior precisão acerca dos resultados, o componente físico e outros fatores como o clima e o manejo de culturas em diferentes solos, devem ser levados em consideração. Desta forma, uma ferramenta que permita integrar os indicadores em um índice, pode auxiliar no monitoramento da SS de forma mais precisa. O “*Soil Management Assessment Framework*” (SMAF), tem sido amplamente utilizado com alto nível de sensibilidade para distinguir solos sob diferentes sistemas de manejo (Andrews et al., 2004; Cherubin et al., 2016; 2021). Trata-se de uma metodologia analítica que integra indicadores biológicos, físicos e químicos do solo em um único índice de SS. O seu desenvolvimento envolve três etapas básicas: seleção do indicador, interpretação e integração a um valor de índice de SS (Figura 4).

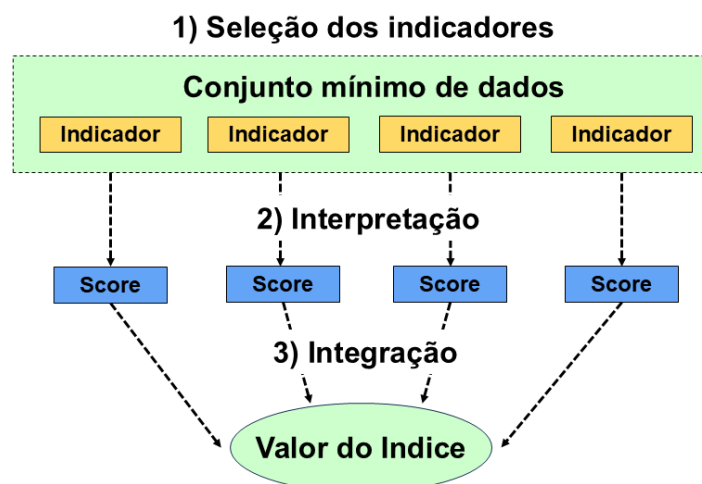


Figura 4. Etapas para a elaboração do índice de saúde do solo. Fonte: Adaptado de Andrews; Karlen; Cambardella, 2004.

No Brasil, o *SMAF* começou a ser utilizada por Cherubin et al. (2016), em um estudo que avaliou os impactos das mudanças no uso da terra na região do Cerrado (vegetação nativa/pastagem/cana-de-açúcar). Logo após, outros estudos foram surgindo, como o de Cherubin et al. (2017), que permitiu validar a eficácia da ferramenta em auxiliar os agricultores brasileiros em relação ao manejo do solo. Desta forma, novos estudos que objetivem avaliar a SS em função de diferentes manejos culturais, solos e condições climáticas, devem ser incentivados, permitindo maiores possibilidades de uso para a ferramenta. Assim, a *SMAF* pode auxiliar na avaliação do potencial agronômico e sustentável do CLE em solos brasileiros, possibilitando elucidar o manejo desta prática e os seus efeitos a longo prazo no solo e produtividade de grãos em condições tropicais.

REFERÊNCIAS

Abay KA, Breisinger C, Glauber J, Kurdi S, Laborde D, Siddig K (2023) The Russia-Ukraine war: Implications for global and regional food security and potential policy responses. **Global Food Security** 36:100675.

Adhikari K, Hartemink AE (2016) Linking soils to ecosystem services - a global review. **Geoderma** 262:101–111.

Adetunji AT, Ncube B, Mulidzi R, Lewu FB (2020) Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research** 204: 104717.

Andrews SS, Karlen DL, Cambardella C (2004) The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. **Soil Science Society of America Journal** 68: 1945–1962.

Afáz DCS, Bertolazi KB, Viani RAG, Souza CF (2017) Composto de lodo de esgoto para o cultivo de eucalipto. **Revista Ambiente e Água** 12: 112–123.

Agência Senado, **Governo: Dependência externa de fertilizantes vai continuar nos próximos anos**. Brasília-DF, 25 de maio de 2022. Disponível em:< <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2022/05/24/governo-dependencia-externa-de-fertilizantes-vai-continuar-nos-proximos-anos>>. Acesso em: 12 nov. 2024.

Argenta CV, Brum AL, Allebrandt SL, Mueller AA (2023) A realidade do mercado de fertilizantes no Brasil: Uma breve análise. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – Rama 6**: e10998.

Arndt C, Diao X, Dorosh P, Pauw K, Thurlow J (2023) The Ukraine war and rising commodity prices: Implications for developing countries. **Global Food Security** 36: 100680.

Bhattacharya D, Tripathy S, Swain DK, Mitra A (2024) Can organic farming improve the soil properties, food quality and human health? **Food and Humanity** 3: 100398.

Baveye PC, Shnee LS, Boivin P, Laba M, Radulovich R (2020) Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions. **Frontiers in Environmental Science** 8.

Beacham JD, Jackson P, Jaworski CC, Krzywoszynska A, Dicks LV (2023) Contextualizing farmer perspectives on regenerative agriculture: A post-productivist future? **Journal of Rural Studies** 102: 103100.

Bittencourt S, Aisse MM, Serrat BM (2017) Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: Estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental** 22: 1129–1139.

Brasil (2023). Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Secretaria de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços. **Plano nacional de fertilizantes 2050: Uma estratégia para os fertilizantes no Brasil** / Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, Secretaria de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços. -- Brasília: SDIC/MGI, 197 p.

Brasil (2020). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizante em solos, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.161, p. 265, 21 ago. Seção 1.

Brasil (2020). Instrução normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. **Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.134, p. 5, 15 jul. Seção 1.

Brevik EC Burgess LC (2014) The Influence of Soils on Human Health. **Nature Education Knowledge** 5:1.

Bueno PAA, Oliveira VMT, Gualdi BL, Silveira PHN, Pereira RG, Freitas CES, Bueno RO, Sekine ES, Schwarcz KD (2018) Microbiological indicators of recovery soil quality in agroforestry system. **Acta Brasiliensis** 2: 40–44.

Bueno MP, Andrade JRE, Demarchi PH, Gonçalves PB, Macedo KG (2023) Impasses da produção de fertilizantes. **Revista Gestão e Secretariado** 14: 11077-11091.

Bunemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, De Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mader P, Pulleman M, Sukkel W, Van Groenigen JW, Brussaard L (2018) Soil quality – a critical review. **Soil Biology Biochemistry** 120: 105–125.

Cardoso EJBN, Vasconcellos RLF, Bini D, Miyauchi MYH, Santos CA, Alves PRL, Paula AM, Nakatani AS, Pereira JM, Nogueira MA (2013) Soil health: Looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, 70: 274-289.

Cavalcante VS, Santos VR, Santos Neto AL, Santos MAL, Santos CG, Costa LC (2012) Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16: 521–528.

Chang T, Feng G, Paul V, Adeli A, Brooks JP (2022) Chapter Three-Soil health assessment methods: Progress, applications and comparasion. **Advances in Agronomy**, 172: 129-210.

Chavarría DN, Verdenelli RA, Serri DL, Restovich SB, Andriulo AE, Meriles JM, Vargas-Gil S (2016) Effect of cover crops microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. **European Journal of Soil Biology**, 76: 74–82.

Chaudhry H, Vasava HB, Chen S, Saurette D, Beri A, Gillespie A, Biswas A (2024) Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility. **Sensors**, 24: 864.

Cherubin MR, Eitelwein MT, Fabbris C, Weirich SW, Silva RF, Silva VR, Basso CJ (2015) Qualidade física, química e biológica de um latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39: 615–625.

Cherubin MR, Karlen DL, Franco AL, Cerri CE, Tormena CA, Cerri CC (2016) A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal** 80: 215-226.

Cherubin MR, Tormena CA, Karlen DL (2017) Soil quality evaluation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with contrasting texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 41: 1–18.

Cherubin MR, Bordonal RO, Castioni GA, Guimarães EM, Lisboa IP, Moraes LAA, Menandro LMS, Tenelli S, Cerri CEP, Karlen DL, Carvalho JNL (2021) Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops & Products** 163: 113315.

Cherubin MR, Carvalho ML, Rodrigues M (2023) Saúde do solo: entendendo os conceitos, relevância e suas aplicações na agricultura e meio ambiente. **Informações Agronômicas – Nutrição de Plantas** 18.

Compainha nacional de abastecimento (2024) **Boletim da safra de grãos 3º levantamento-Safra 2024/25**. Disponível em :< <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em 16 jan.

Compainha nacional de abastecimento (2025) **Boletim logístico ano VIII**. Disponível em:< <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/boletim-logistico/item/25103-boletim-logistico-dezembro-2024>>. Acesso em 16 jan.

Coser TRC, Ramos MLG, Figueiredo CC, Carvalho AM, Cavalcante E, Moreira MKR, Araújo PSM, Oliveira SA (2016) Soil microbiological properties and available nitrogen for corn in monoculture and intercropped with forage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51: 1660–1667.

Dadalto JP, Fernandes HC, Teixeira MM, Cecon PR, Teixeira MM, Cecon PR, Matos AT (2015) Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola** 35: 506–513.

Dahiya P, Singh N, Singh A (2022) Impact of sewage sludge application on microbial diversity and fertility of soil: A long-term study. **Development in Waste Water Treatment Research and processes** 91-106 p.

D'avila JV, Chaves MC, Santos FS, Peres AAC (2019) Análise da viabilidade econômica-financeira de sistemas de disposição final do lodo de esgoto. **Revista em Agronegócio e meio ambiente** 12.

Daryanto S, FU B, Wang L, Jacinthe PA, Zhao W (2018) Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. **Earth-Science Review** 185: 357–373. Debiasi H, Levien R, Trein CR, Conte O, Kamimura KM (2010) Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 45.

Dillon B, Barret C (2016) Global oil prices and local food prices: Evidences from east Africa. **American Journal of Agricultural Economics**, 98: 154-171.

Doran JW (1994) Defining and assessing soil quality. **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment** 3–21.

Fagundes MO, Reis DA, Portella RB, Perina FJ, Bogiani JC (2019) Qualidade de um latossolo sob plantio convencional e sistema plantio direto no cerrado baiano, Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais** 10: 281–297.

Farias PIV, Freire E, Cunha ALC, Grumbach RJS, Antunes AMS (2020) The Fertilizer Industry in Brazil and the Assurance of Inputs for Biofuels Production: Prospective Scenarios after COVID-19. **Sustainability** 12: 8889.

Franziskowski MA, Seidel EP, Fey E, Anschau KA, Mottin MC (2019) Propriedades físicas do solo no sistema de plantio direto e preparo reduzido cultivado com plantas de cobertura. **Revista Engenharia na Agricultura** 27: 556–564.

Freitas L, Oliveira IA, Silva LS, Frare JCV, Filla VA, Gomes RP (2017) Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Unimar Ciências** 26: 8–25.

He MM, Tian GM, Liang XQ (2009) Phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead during the aerobic composting of sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials** 163: 671–677.

He L, Lu S, Wang C, Mu J, Zhang Y, Wang X (2021) Changes in soil organic carbon fractions and enzyme activities in response to tillage practices in the Loess Plateau of China. **Soil and Tillage Research** 209: 104940.

Headey DD, Alderman HH (2019) The relative caloric prices of Healthy and unhealthy food differ systematically across income levels and continents. **The Journal of Nutrition** 149: 2020-2033.

Hermiyanto B, Winarso S, Kusumandaru W (2016) Soil Chemical Properties Index of Tobacco Plantation Land in Jember District. **Agriculture and Agricultural Science Procedia** 9: 181–190.

Jakubus M, Graczyk M (2020) Microelement variability in plants as an effect of sewage sludge compost application assessed by different statistical methods. **Agronomy** 10: 642.

Jakubus M, Bakinowsk E (2018) Visualization of long-term quantitative changes of microelements in soils amended with sewage sludge compost evaluated with two extraction solutions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 49: 1355–1369.

Jayaramaiah RH, Martins CSC, Egidi E, Macdonald CA, Wang JT, Liu H, Reich PB, Baquerizo MD, Singh BK (2025) Soil function-microbial diversity relationship is impacted by plant functional groups under climate change. **Soil Biology and Biochemistry** 200: 109623.

Ji L, Tan W, Chen X (2019) Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions. **Soil and Tillage Research** 185: 1–8.

Jimenez LCZ, Queiroz HM, Cherubin MR, Ferreira TO (2022) Applying the Soil Management Assessment Framework (SMAF) to Assess Mangrove Soil Quality. **Sustainability** 14: 3085.

Jian J, Lester BJ, DU X, Reiter MS, Stewart RD (2020) A calculator to quantify cover crop effects on soil health and productivity. **Soil and Tillage Research** 199: 104575.

Junod MF, Ried B, Sims I, Miller AJ (2024) Cover crops in cereal rotations: A quantitative review. **Soil and Tillage Research** 238: 105997.

Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Harris RF, Schuman GE (1997) Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal** 61: 4–10.

Khangura R, Ferris D, Wagg C, Bowyer J (2023) Regenerative Agriculture-A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. **Sustainable** 15: 2338.

Kopptike PM, Minasny B, Pendall E, Rumpel C, Mckenna B (2023) Healthy soil for healthy humans and a healthy planet. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 54: 210-221.

Lehmann J, Bossio DA, Kogel-Knabner I, Rilling M (2020) The concept and future prospects of soil health. **Nature reviews earth & environment** 1: 544-553.

Levi N, Hillel N, Zaady E, Rotem G, Ziv Y, Karnieli A, Paz-kagan T (2021) Soil quality index for assessing phosphate mining restoration in a hyper-arid environment. **Ecological Indicators**, 125: 107571.

Michelon CJ, Junges E, Casali CA, Pellegrini JBR, Neto LR, Oliveira ZB, Oliveira MB (2019) Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18: 230-239.

Machado MA, Rhoden AC (2021) Aplicação da agricultura regenerativa no Brasil: Estudo de caso no oeste catarinense. **Anais de Agronomia**, 2: 14-36.

Mamabolo E, Pryke JS, Gaigher R (2024) Soil fauna diversity is enhanced by vegetation complexity and no-till planting in regenerative agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 367: 108973.

Mazetto AM, Cerri CEP, Feigl BJ, Cerri CC (2016) Atividade da biomassa microbiana do solo alterada pelo uso da terra no sudoeste da Amazônia. **Bragantia**, 75: 79–86.

Mendes IC, Cunha MH, Reis Júnior FB, Fernandes MF, Chaer GM, Mercante FM, Zilli JE (2009) **Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: Utopia ou realidade?** Embrapa Cerrados, 31 p.

Mendes IC, Chaer GM, Reis Júnior FB, Sousa DMG, Silva ODD, Oliveira MI, Malaquias JV (2021) **Tecnologia BioAs: Uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. 50 p.

Mendes IC, Sousa DMG, Chaer GM, Reis Junior FB, Lopes AAC, Dantas OD, Morales L (2021) Soil bioanalysis: a simple and effective tool to access and interpret soil health. In: Keep soil alive, protect soil biodiversity: global symposium on soil biodiversity 19–22 April 2021. **Proceedings. Food & Agriculture Organization**, 256 p.

Mendes IC, Sousa DMG, Dantas OD, Lopes AAC, Júnior FBR, Oliveira, MI, CHAER, G.M (2021) Soil quality and grain yield: A win-win combination in clayey tropical oxisols. **Geoderma** 388: 114880.

Moraes MT, Olbermann FJR, Bonetti JA, Pilegi, LR, Costa MVR, Pacheco V, Rogers CD, Guimarães RML (2024) The impacts of cover crop mixes on the penetration resistance model of Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, 242: 106138.

Nascimento VVF, Pereira GFX, Melo CCV, Pereira GFX, Melo CCV, Freire AI, Souza FBM, Martins AD (2022) Logistic analysis in grain production in Brazil. **Research, Society and Development**, 11: e47911730597.

Nogueira TAR, Sampaio RA, Fonseca IM, Ferreira CS, Santos SE, Ferreira LC, Gomes E, Fernandes LA (2007) Metais pesados e patógenos em milho e feijão caupi consorciados, adubados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 11: 331–338.

Nunes MR, Veum KS, Parker PA, Holan SH, Karlen DL, Amsili, JP, Van Es HM, Wills SA, Seybold CA, Moorman TB (2021) The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, 85: 1196-1213.

Ogino CT, Junior GC, Popova ND, Filho JGM (2021) Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o centro-oeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 59.

Oliveira WRD, Ramos MLG, Carvalho AM, Coser TR, Silva AMM, Lacerda MM, Souza KW, Marchão RL, Vilela L, Purolnik K (2016) Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51: 1501–1510.

Oliveira GS, Jalal A, Prates AR, Teixeira Filho MCM, Alves RS, Silva LC, Nascimento REN, Silva PST, Arf O, Galindo FS, Oliveira FC, Abreu-Junior CH, Jani AD, Capra GF, Nogueira TAR (2023) Common Bean Productivity and Micronutrients in the Soil-Plant System under Residual Applications of Composted Sewage Sludge. **Plants** 12: 2153.

Pedrosa MM, Lobo RN, Vieira GEG, Sousa JF, Silva FM (2019) Lodo de esgoto doméstico: Característica físicas, químicas e biológicas. **Multi Debates** 3: 206-218.

Pedrosa MVB, Lima WL, Amaral AA, Carvalho AHO (2018) Biossólido de lodo de esgoto na agricultura: desafios e perspectivas. **Revista Agrogeoambiental** 9: 125–142.

Pereira AP, Schoffel A, Koefender J, Camera JN, Golle DP, Horn, RC (2017) Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias** 44: 799–807.

Picarello E, Baldantoni D, Muniategui-Lorenzo S, Concha-Graña E, De Nicola F (2021) A synthetic quality index to evaluate the functional stability of soil microbial communities after perturbations. **Ecological Indicators** 128: 107844.

Pissinatti A, Moreira A, Santoro PH (2018) Yield components and nutrients content in summer cover plants used in crop rotation in no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 49: 1604–1616.

Prates AR, Coscione AR, Teixeira Filho MCM, Miranda BG, Arf O, Abreu-Júnior CH, Oliveira FC, Moreira A, Galindo FS, Sartori MMP, He Z, Jani, AD, Capra GF, Ganga A, Nogueira TAR (2020) Composted sewage sludge enhances soybean production and agronomic performance in naturally infertile soils (Cerrado Region, Brazil). **Agronomy** 10: 1677.

Prates, AR (2020). **Atributos químicos do solo, estado nutricional e desempenho agrônômico na sucessão soja-milho adubados com composto de lodo de esgoto na região do cerrado**. 173 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

Pires MO (2020) ‘Cerrado’, old and new agricultural frontiers. **Brazilian Political Science Association** 14: e0004.

Reichert JM, Morales CAS, Bastos F, Sampietro JA, Cavalli JP, Araújo EF, Srinivassan R (2021) Tillage recommendation for commercial forest production: Should tillage be based on soil penetrability, bulk density or more complex, integrative properties? **Geoderma Regional** 25: e00381.

Romano I, Zelikoff JT (2024) Soil health is human health. **EXPLORE** 20: 103047.

Sattolo TMS, Pereira LM, Otto R, Francisco O, Duarte AP, Kappes C, Prochnow LI, Cherubin MR (2021) Effects of land use, tillage management, and crop diversification on soil physical quality in Cerrado agricultural systems. **Soil Science Society of America Journal** 85: 1799–1813.

Silva MO, Santos MP, Sousa ACP, Silva RLV, Moura IAA, Silva RS, Costa KDS (2021) Qualidade do solo: indicadores biológicos um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development** 7: 6853–6875.

Silva Guimarães JC, Cordeiro J, Ferreira Rosa, DCV (2018) Utilização do lodo de esgoto na agricultura: Uma análise cienciométrica. **Research, Society and Development** 7: 479391.

Silva RS, Teixeira Filho, MCM, Jalal A, Alves RS, Elias NC, Nascimento REN, Abreu-Júnior, CH, Jani, AD, Capra, GF, Nogueira TAR (2024) Treating Tropical Soils with Composted Sewage Sludge Reduces the Mineral Fertilizer Requirements in Sugarcane Production. **land** 13: 1820.

Silva MO, Santos MP, Sousa ACP, Silva RLV, Moura, IAA Silva, Silva RSS, Costa KDS (2021) Qualidade do solo: indicadores biológicos um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, 7: 6853–6875.

Silva JAR, Terra ABC, Assis C, Florentino LA, Putti FF (2020) Tratamento de dejetos no Brasil: Comparativo entre as técnicas de compostagem e biodigestores anaeróbios. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente** 13: 797–817.

Silva MB, Camargos LS, Teixeira Filho MCM, Sousa LA, Coscione AR, Lavres J, Abreu-Júnior CH, He Z, Zhao F, Jani AD, Capra GF, Nogueira TAR (2023) Residual effects of composted sewage sludge on nitrogen cycling and plant metabolism in a no-till common bean-palisade grass-soybean rotation. **Frontiers in Plant Science** 14.

Silva AMM, Araújo VLVP, Cardoso EJBN (2023) Revisiting the past to understand the present and future of soil health in Brazil. **Frontiers in Soil Science**, 3.

Soussana JF, Lemaire G (2014) LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 190: 9–17.

Tan SSX, Kuebbing SE (2023) A synthesis of the effect of regenerative agriculture on soil carbon sequestration in Southeast Asian croplands. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 349: 108450.

Uddin S, Zaman M, Martínez-Guijarro K, Al-Murad M, Behbehani M, Habibi N, Al-Mutairi A (2025) Sewage sludge as soil amendment in arid soils – A trace metal, nutrient and trace organics perspective. **Emerging Contaminants** 11: 100420.

Wolschick NH, Barbosa FT, Bertol I, Santos KF, Werner RS, Bagio B (2016) Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 15: 134–143.

Zhang J, Sáez-Sandino T, Maestre FT, Feng Y, Yu Y, Berdugo M, Wang J, Coleine C, García-Velázquez L, Singh BK, Delgado-Baquerizo M (2025) Global environmental dependences of soil biodiversity and functions are modified by water availability thresholds. **Science of the Total Environment**, 958: 178033.

CAPÍTULO 2 – FERTILIZANTE ORGÂNICO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA INCREMENTA OS INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO NO CERRADO

RESUMO – O fertilizante orgânico, advindo de composto de lodo de esgoto (CLE) e associado ao cultivo de plantas de cobertura, podem incrementar os indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, potencializando a produtividade das culturas no Cerrado. Obejtivamos avaliar o efeito do cultivo de plantas de cobertura associadas ao fornecimento de fertilizante orgânico (*i.e.*, composto de lodo de esgoto – CLE) ou mineral, monitorando a qualidade do solo por meio de indicadores químicos, físicos e biológicos e produtividade de soja no Cerrado. Um experimento de campo de seis anos foi realizado no Cerrado brasileiro usando um delineamento em blocos casualizados com oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial, sendo: dois sistemas de cultivo/rotação (I. soja/milho/capim-marandu/feijão-comum/aveia/trigo) e II. arroz/feijão/capim-marandu/milho/soja + 'mix' de nabo forrageiro, crotalária e milheto) e quatro tipos de adubação (*i* = sem CLE e fertilizantes minerais, *ii* = sem CLE e com adubação mineral convencional, *iii* = fornecimento de 15 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) e *iv* = fornecimento de 30 t ha⁻¹ de CLE (base úmida). A combinação de plantas de cobertura ou não com o manejo de fertilizantes incrementou os indicadores do solo nas profundidades de 0–0,1 e 0,1–0,2 m. Em relação ao tratamento controle (sem CLE ou fertilizantes minerais), a aplicação de 30 t ha⁻¹ de CLE combinada com o cultivo em 'mix' incrementou a macroporosidade e a porosidade total do solo em 116,7% e 12,2%, respectivamente, na profundidade de 0–0,1 m. Também, reduziu a densidade e a resistência do solo à penetração em 15,7% e 39,2% nessa mesma profundidade e reduziu a resistência à penetração em 25,4% na profundidade de 0,1–0,2 m. Em relação ao controle, o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou em 448,6% o teor de P, em 28,3% a CTC e em 8,6% o pH do solo na profundidade de 0–0,1 m. Em 0,1–0,2 m, os incrementos foram de 4,7% para o pH e 15,6% para a CTC. Quando associado ao cultivo em 'mix', o CLE também elevou o teor de Zn em 336,0% na camada de 0–0,1 m. O residual de 30 t ha⁻¹ de CLE promoveu incrementos de 15,3% (0–0,1 m) e 5,1% (0,1–0,2 m) no C total, de 11,7% no N total (0,1–0,2 m) e 5% na glomalina facilmente extraível (0–0,1 m). Também elevou a atividade das enzimas β -glucosidase (26,6%) e arylsulfatase (11,7%) em 0–0,1 m, além de aumentar a biomassa seca das plantas de cobertura, especialmente no cultivo em 'mix'. Quando combinado ao residual de 15 t ha⁻¹ de CLE, o 'mix' aumentou a produtividade de grãos de soja em 14,7% e 17,6%, comparado ao controle e à adubação mineral, respectivamente. Os resultados reforçam que o manejo de CLE, associado ao cultivo de plantas de cobertura, especialmente o 'mix', é uma alternativa sustentável para reduzir a dependência de fertilizantes minerais, favorecer o aproveitamento adequado do lodo de esgoto sanitário, promovendo incrementos no solo e na produtividade agrícola de forma sustentável no Cerrado.

Palavras-chave: Rotação de culturas; Economia circular; Fertilizante sustentável, Resíduo urbano, Manejo do solo.

CHAPTER 2 – ORGANIC FERTILIZER ASSOCIATED WITH COVER CROPS ENHANCES SOIL QUALITY INDICATORS UNDER NO-TILLAGE IN THE CERRADO

ABSTRACT – Organic fertilizer from sewage sludge compost and associated with cover crops can increase the soil's physical, chemical and biological indicators, enhancing crop productivity in the Cerrado. The aim was to evaluate the effect of growing cover crops associated with the supply of organic fertilizer (*i.e.*, composted of sewage sludge - CSS) or mineral fertilizer, monitoring the soil by monitoring chemical, physical and biological soil indicators and soybean productivity in the Cerrado. A six-year field experiment was conducted in the Brazilian Cerrado using a randomized block design with eight treatments and four replications. The treatments were arranged in a factorial design, with two cropping/rotation systems (I. soybean/maize/capim-marandu/common bean/oats/wheat) and (II. rice/bean/capim-marandu/maize/soybean + mix of forage turnip, crotalaria and millet) and four types of fertilization (*i* = no fertilization with CSS and mineral fertilizers, *ii* = no fertilization with CSS and with conventional mineral fertilization, *iii* = supply of 15 Mg ha⁻¹ of CSS (wet basis) and *iv* = supply of 30 Mg ha⁻¹ of CSS (wet basis). Combining cover crops or not with fertilizer management increased soil indicators at the 0–0.1 and 0.1–0.2 m layers. Compared to the control treatment (without CSS or mineral fertilizers), the application of 30 Mg ha⁻¹ of CSS combined with mix cultivation increased soil macroporosity and total porosity by 116.7% and 12.2%, respectively, at the 0–0.1 m layer. It also reduced soil bulk density and resistance to penetration by 15.7% and 39.2% at the same depth and reduced resistance to penetration by 25.4% at the 0.1–0.2 m depth. Compared to the control, the residual of 30 t ha⁻¹ of CSS increased the P content by 448.6%, the CEC by 28.3% and the soil pH by 8.6% at the 0–0.1 m depth. At 0.1–0.2 m, the increases were 4.7% for pH and 15.6% for CEC. When combined with mix cultivation, CSS also increased Zn content by 336.0% in the 0–0.1 m layer. The residual of 30 Mg ha⁻¹ of CSS promoted increases of 15.3% (0–0.1 m) and 5.1% (0.1–0.2 m) in total C, 11.7% in total N (0.1–0.2 m) and 5% in easily extractable glomalin (0–0.1 m). It also increased the activity of the enzymes β -glucosidase (26.6%) and arylsulfatase (11.7%) at 0–0.1 m, as well as increasing the dry biomass of the cover crops, especially in the mix. When combined with a residual of 15 Mg ha⁻¹ of CSS, the mix increased soybean productivity by 14.7% and 17.6%, compared to the control and mineral fertilization, respectively. Our results reinforce that CSS management, associated with the cultivation of cover crops, especially the 'mix', is a sustainable alternative for reducing dependence on mineral fertilizers, promoting the proper use of sanitary sewage sludge, promoting increases in soil and agricultural yield in a sustainable way in the Cerrado.

Keywords: Crop rotation; Circular economy; No-tillage; Soil management; Sustainable fertilizers, Urban waste.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural não renovável de grande importância para a humanidade (Pandey et al., 2021). Sua degradação associa-se a diminuição de sua capacidade em produzir alimentos de forma sustentável a longo prazo (Kopittke et al., 2019). Recuperar as funções de um solo degradado consiste em intervenções planejadas, com o objetivo de reverter danos causados por práticas agrícolas intensivas, desmatamentos, atividades industriais e outras ações antrópicas (Pamba et al., 2023). Estas iniciativas estão diretamente conectadas aos princípios da economia circular (EC).

A EC é um conceito que visa otimizar o uso de recursos e minimizar desperdícios, adotando um modelo sustentável que visa atender às demandas globais, especialmente no que tange à gestão de resíduos e à segurança alimentar (Moustabchir; Ouakil; Ouazzani, 2024). Desta forma, com a projeção de uma população mundial de 9,7 bilhões até 2050 (Onu, 2019), o aumento da geração de resíduos como o lodo de esgoto (LE), torna-se iminente (Feng et al., 2023). Portanto, incentivar a transformação destes resíduos e fornecer soluções sustentáveis para a agricultura, podem contribuir para a manutenção da segurança alimentar.

Diversos estudos destacam o potencial do LE como fonte alternativa a adubação mineral para o cultivo de plantas (Marin; Rusanescu, 2023; Aleisa; Alsulaili; Almuzaini, 2021; Shan et al., 2021). De forma geral, sua composição consiste em uma mistura complexa de componentes orgânicos como lipídeos, proteínas, lignina e carboidratos, além de ser fonte de nutrientes para as plantas por conter em média 3–4% de N, 0,5–2,5% de P e micronutrientes como Cu e Zn (Regitano et al., 2021). Em relação ao percentual produzido de LE, Irlanda (80%), Noruega (55%) Estados Unidos (50%), China (50%), Lituânia (50%), Bulgária (50%), França (40%), Alemanha (25%) destinam esse resíduo às áreas agrícolas (Buta et al., 2021). Por outro lado, estima-se que sejam geradas no Brasil 372 mil toneladas (matéria seca) de LE (Mateo-Sagasta et al., 2015), entretanto, apenas uma pequena parte (cerca de 3%) é destinada à agricultura (Matos, 2018).

Para a sua correta utilização, o LE deverá passar um processo que possibilite reduzir a presença de patógenos e os riscos de contaminação com

metais pesados (Li et al., 2021; Zheng et al., 2021). Uma alternativa encontrada pelas Estações de tratamento de esgoto é o processo de compostagem (Cruz et al., 2017). Após este processo, sua aplicação e reciclagem no solo associado a sistemas de manejos conservacionistas como o sistema plantio direto (SPD), podem funcionar como uma alternativa para recuperar parte da capacidade produtiva de solos degradados ou manejados de forma convencional.

Uma das premissas do SPD é a produção e a permanência de resíduos de diversas espécies vegetais em rotação de culturas na área, na forma de palhada (Ghimire et al., 2017). Diferentes espécies, solteiras ou combinadas em um “mix”, são recomendadas para a região do Cerrado, em função de suas raízes profundas, tolerância ao estresse hídrico e alta produção de biomassa (Spliethoff; Rampim; Pott, 2019). Outros benefícios associados ao uso de plantas de cobertura são o fornecimento de nutrientes as culturas sucessoras a médio e longo prazo (Topa; Cara; Jitareanu, 2021), diminuição das variações de temperatura e umidade (Attia et al., 2024), aumento do teor e proteção física da matéria orgânica (Wulanningtyas et al., 2021), além da manutenção das populações de microrganismos (Farhangi-Abri; Ghassemi-Golezani; Torabian, 2021), melhorando os aspectos químicos, físicos e biológicos do solo (Young; Ros; Vries, 2021). Estes aspectos relacionam-se ao bom funcionamento dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo (Pereira et al., 2018).

Embora já existam estudos evidenciando a viabilidade do uso do composto de lodo de esgoto (CLE) na agricultura (Prates et al., 2022; Silva et al., 2023; Oliveira et al., 2023), no presente estudo, buscamos compreender melhor os sistemas de rotação de culturas e os efeitos do cultivo de plantas de cobertura com fertilizantes minerais e orgânico. Para tal, testamos as seguintes hipóteses: *i*) o cultivo de plantas de cobertura associado às aplicações de CLE em solo de Cerrado aumentam a produtividade das culturas agrícolas cultivadas sob SPD de modo similar ou superior ao observado apenas com o fornecimento de fertilizantes minerais e *ii*) o sistema de cultivo conservacionista com crotalaria juncea (*Crotalaria juncea* L.), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e milheto (*Pennisetum glaucum* L.) na forma de “mix” de plantas de cobertura utilizadas em comparação ao cultivo “solteiro” do capim-marandu (*Urochloa brizantha*), é mais efetivo na melhoria da qualidade do solo

quando inserido nas rotações – no qual haverá maior descompactação do solo, fixação de N_2 , maior ciclagem de nutrientes e aumento na produtividade de grãos. Desta forma, em um experimento de seis anos, avaliamos o efeito do cultivo de plantas de cobertura associado ao fornecimento de fertilizantes minerais ou orgânico (CLE), monitorando a qualidade do solo por meio da avaliação de indicadores químicos, físicos e biológicos do solo e a produtividade de plantas sob SPD no Cerrado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido em condições de campo, no município de Selvíria-MS, Brasil, apresentando as coordenadas geográficas de 20°20'35" S e 51°24'04" W, com altitude de 358 m (Figura 5).

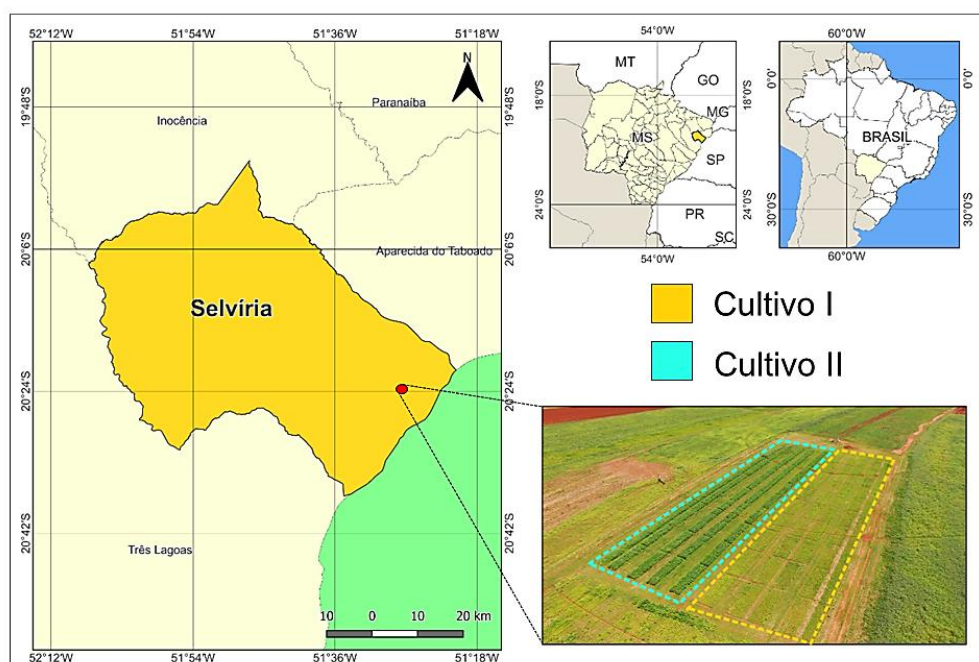


Figura 5. Área experimental localizada no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. Cultivo I: Cultivo de capim-marandu. Cultivo II: Cultivo ‘mix’ de plantas de cobertura.

A região apresenta médias anuais de: precipitação pluvial de 1.370 mm, temperatura de 24,5 °C e umidade relativa do ar de 75%. O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões

chuvosos e invernos secos (Lombardi Neto; Drugowich, 1994). Durante toda a realização do experimento foram coletados dados diários referentes à temperatura média e precipitação pluvial (Figura 6).

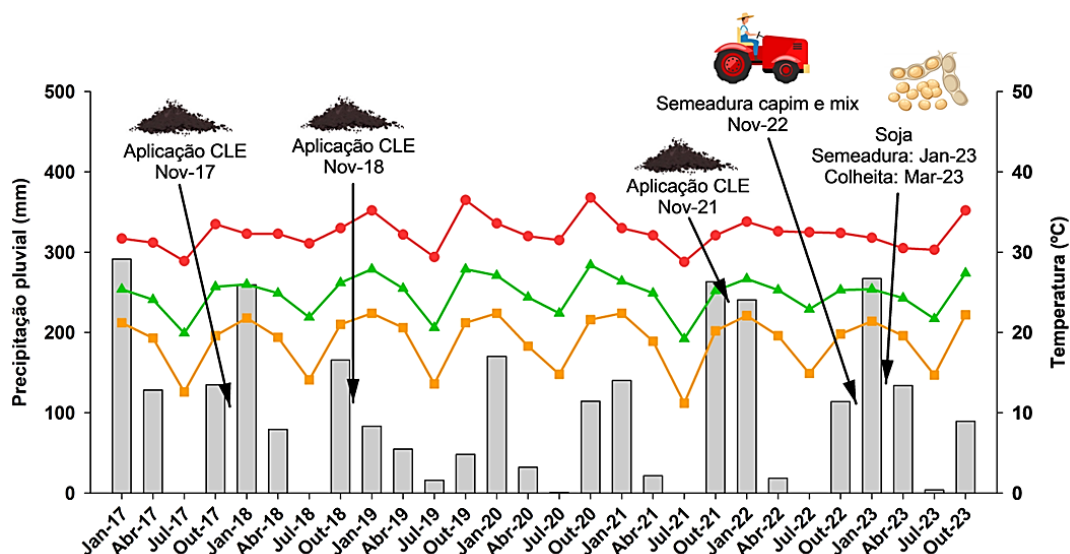


Figura 6. Temperatura mínima (amarelo), média (verde) e máxima (vermelho) (°C) e precipitação pluvial (mm) ao longo do período experimental. Fonte: Sistema de Monitoramento Climático da UNESP, Câmpus de Ilha Solteira.

O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico argiloso (Santos et al., 2018) ou Rhodic Hapludox (USDA, 2022) o qual vinha sendo cultivado com milho em sistema convencional e sem irrigação, por aproximadamente 10 anos. A partir de 2017/18 (ano I), foram implantando dois sistemas de cultivo no qual os dois primeiros anos as culturas foram cultivadas em sucessão e, após esse período, sob SPD por meio da rotação entre as culturas e cultivo (solteiro ou mix) de plantas de cobertura (Figura 7).

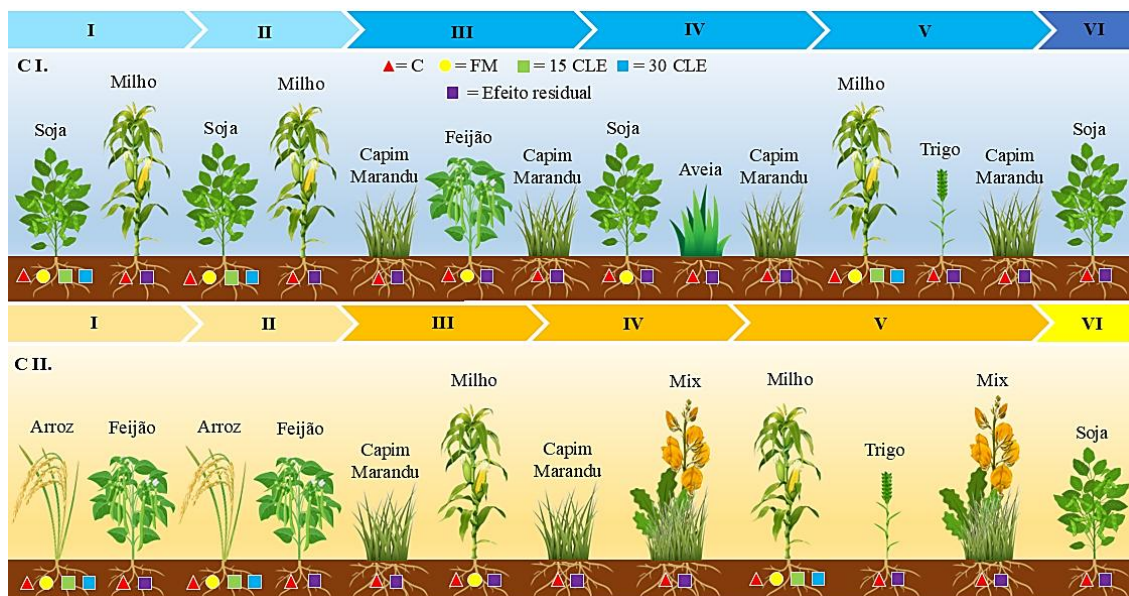


Figura 7. Cultivos (Cultivo I: C I e Cultivo II: C II) e manejos da adubação mineral e orgânica para cada ano agrícola estudado. FM: Fertilizantes minerais fontes de N, P, K, B e Zn. CLE: fertilizante orgânico a base de composto de lodo de esgoto (CLE), aplicado nas doses de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida). Controle (C). As doses de CLE foram estabelecidas conforme recomendações técnicas do fornecedor do fertilizante orgânico (Empresa Tera Ambiental). Planta de cobertura “mix”: nabo forrageiro, crotalária e milheto. Anos agrícolas: I = 2017/18, II = 2018/19, III = 2019/20, IV = 2020/21, V = 2021/22 e VI = 2022/23.

2.2. Delineamento experimental e tratamentos

Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com oito tratamentos e quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial sendo: dois sistemas de cultivo (I. soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja) e (II. Arroz de terras altas/feijão/milho/soja+mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja) e quatro tipos de adubação (*i* = sem adubação com CLE e fertilizantes minerais, *ii* = sem adubação do CLE e com adubação mineral convencional, *iii* = fornecimento de 5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) e *iv* = fornecimento de 10 t ha⁻¹ de CLE (base úmida). No ano agrícola 2021/22, as doses acumuladas de CLE corresponderam a 15 e 30 t ha⁻¹ (base úmida) em razão das três aplicações realizadas em 2017/18, 2018/19 e 2021/22. No ano agrícola 2022/23, visando avaliar o efeito residual das três aplicações do fertilizante orgânico, não foi realizado aplicação de CLE.

2.3. Obtenção e caracterização do fertilizante orgânico

O CLE foi obtido na empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP. Trata-se de um fertilizante orgânico Classe B (Brasil, 2020b), produzido a partir da compostagem termofílica de resíduos orgânicos urbanos diversos. A principal matéria prima que compõe o produto é o lodo de esgoto sanitário, cerca de 70% em massa, advindo do tratamento de esgotos sanitários em Jundiaí e Municípios vizinhos. Além do lodo de esgoto, também entra no processo de compostagem, lodos de Sistemas de Tratamento de Águas Residuárias geradas em Agroindústrias, tais como cervejarias e indústrias de alimentos diversos, restos de frutas, legumes e verduras, pré e pós consumo, segregados na fonte e coletados de forma diferenciada, restos de produtos alimentícios industrializados e inservíveis entre outros.

O CLE foi caracterizado ponto de vista químico (pH, CTC, MO, C-orgânico, umidade, As, Ba, B, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Mo, N, Na, Ni, P, Pb, S, Se e Zn) e microbiológico (coliformes termotolerantes, salmonella e ovos viáveis de helmintos), seguindo as recomendações preconizadas na Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama (Conama, 2006), sendo considerado apropriado para uso nesse estudo (Tabela 2). Antes da semeadura da soja e do arroz, as doses de CLE foram distribuídas a lanço nas parcelas em área total. A aplicação foi realizada de forma manual e sem incorporação, levando-se em conta a umidade do material (ano I: $45,5 \pm 0,2$; 2º ano: $35,8 \pm 0,6$ e 3º ano: $36,7 \pm 0,1$). As mesmas análises e procedimentos foram adotados para o CLE que foi aplicado no ano agrícola 2021/22 (Tabela 1). Nos anos agrícolas 2019/20 e 2020/21, foi avaliado o efeito residual do composto, não havendo aplicação de CLE.

Tabela 1. Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).

Característica	Unidade	2017/18	2018/19	2021/22	Valor permitido ⁽¹⁾
Química		Base seca			
pH _(CaCl₂)	-	7,0 $\pm$ 0,1	7,3 $\pm$ 0,0	8,0 $\pm$ 0,4	-- ⁽²⁾
Umidade (60–65	%	41,0 $\pm$ 0,3	34,4 $\pm$ 0,5	36,7 $\pm$ 0,1	--
Umidade Total	%	45,5 $\pm$ 0,2	35,8 $\pm$ 0,6	38,2 $\pm$ 0,1	--
MO Total	g kg ⁻¹	308,7 $\pm$ 9,9	255,0 $\pm$ 7,3	200,0 $\pm$ 26,8	--
C Orgânico	g kg ⁻¹	153,10 $\pm$ 4,80	126,6 $\pm$ 3,57	111,10 $\pm$ 14,87	--
CTC	mmol _c kg ⁻¹	520 $\pm$ 20,0	--	263,3 $\pm$ 81,4	--
C/N	-	12 $\pm$ 0,8	9,0 $\pm$ 0,5	11,0 $\pm$ 3,5	--
N Total	g kg ⁻¹	13,9 $\pm$ 0,2	15,3 $\pm$ 1,5	10,7 $\pm$ 3,0	--
P Total	g kg ⁻¹	12,3 $\pm$ 1,3	14,1 $\pm$ 0,0	16,5 $\pm$ 4,5	--
S Total	g kg ⁻¹	4,8 $\pm$ 0,2	8,4 $\pm$ 1,5	7,3 $\pm$ 0,9	--
Na	mg kg ⁻¹	3930 $\pm$ 32,0	3915 $\pm$ 41,2	--	--
K	g kg ⁻¹	6,00 $\pm$ 2,2	8,2 $\pm$ 0,4	4,7 $\pm$ 2,8	--
Ca	g kg ⁻¹	19,4 $\pm$ 4,4	31,1 $\pm$ 1,1	41,7 $\pm$ 17,4	--
Mg	g kg ⁻¹	5,2 $\pm$ 0,5	9,9 $\pm$ 0,2	11,3 $\pm$ 2,2	--
As	mg kg ⁻¹	3,2 $\pm$ 1,7	--	3,3 $\pm$ 1,1	20,0
B	mg kg ⁻¹	94,0 $\pm$ 4,5	94,0 $\pm$ 4,6	--	--
Cd	mg kg ⁻¹	1,0 $\pm$ 0,0	--	1,0 $\pm$ 0,4	3,0
Cu	mg kg ⁻¹	237,0 $\pm$ 16,5	191,2 $\pm$ 5,8	246,3 $\pm$ 69,0	--
Pb	mg kg ⁻¹	18,0 $\pm$ 1,6	--	17,6 $\pm$ 0,7	150,0
Cr	mg kg ⁻¹	54,2 $\pm$ 1,7	--	64,4 $\pm$ 1,0	--
Fe	mg kg ⁻¹	16400 $\pm$ 130	14708 $\pm$ 249	12405 $\pm$ 522	--
Mn	mg kg ⁻¹	246,0 $\pm$ 37,0	310,0 $\pm$ 15,0	591 $\pm$ 89,0	--
Hg	mg kg ⁻¹	0,2 $\pm$ 0,0	--	0,1 $\pm$ 0,1	1,0
Mo	mg kg ⁻¹	5,7 $\pm$ 0,2	--	6,6 $\pm$ 2,4	--
Ni	mg kg ⁻¹	26,5 $\pm$ 0,5	--	23,3 $\pm$ 4,6	70,0
Zn	mg kg ⁻¹	456 $\pm$ 8,0	684 $\pm$ 7,2	1083 $\pm$ 339,5	--
Microbiológica					
<i>Salmonella</i> sp	NMP/10g	Ausente	Ausência em 10 g de MS		
Coliformes	NMP/g	0	1.000,0		
Ovos Viáveis de Helmintos	Ovos/g	0,12	1,0		

NMP = Número mais provável. ⁽¹⁾ Instrução normativa N° 7 MAPA (2016). ⁽²⁾ Não determinado.

2.4. Histórico e desenvolvimento do experimento

O preparo inicial da área experimental foi realizado em setembro de 2017, época em que foi realizada uma escarificação a 0,3 m de profundidade. Com base nos resultados da avaliação da fertilidade do solo, foi realizada a calagem (2,2 t ha⁻¹) com calcário agrícola (80% de PRNT), objetivando elevar a saturação por bases a 70% e, em seguida, aplicação de 1,8 t ha⁻¹ de gesso agrícola

(Cantarella et al., 2022; Raij et al., 1997), em superfície e sem incorporação. Antes da instalação do experimento foram realizadas amostragens do solo nas camadas de 0–0,2 m de profundidade para caracterizações física e química (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos químicos ⁽¹⁾ e físicos ⁽²⁾ das amostras de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico utilizados no experimento (Média ± desvio-padrão; $n = 3$).

Atributos	Unidade	Profundidade (m)
		0–0,2
pH _(CaCl2)	--	4,5 ± 0,1
Matéria orgânica	g dm ⁻³	19 ± 1,2
Fósforo	mg dm ⁻³	16 ± 0,6
Potássio	mmol _c dm ⁻³	1,7 ± 0,2
Cálcio	mmol _c dm ⁻³	13 ± 0,6
Magnésio	mmol _c dm ⁻³	12 ± 1,0
Alumínio	mmol _c dm ⁻³	4 ± 0,0
H+Al	mmol _c dm ⁻³	37 ± 2,3
SB	mmol _c dm ⁻³	27,0 ± 1,7
S-SO ₄	mg dm ⁻³	15 ± 0,6
CTC	mmol _c dm ⁻³	63,7 ± 0,8
V	%	42 ± 3,2
Boro	mg dm ⁻³	0,22 ± 0,1
Cobre	mg dm ⁻³	1,8 ± 0,1
Ferro	mg dm ⁻³	15 ± 0,6
Manganês	mg dm ⁻³	18,8 ± 0,6
Zinco	mg dm ⁻³	0,6 ± 0,1
Areia (> 0.05 mm)	g kg ⁻¹	553 ± 12,9
Silte (> 0.002 e < 0.05 mm)	g kg ⁻¹	81 ± 3,2
Argila (< 0.002 mm)	g kg ⁻¹	372 ± 19,0
Textura	-	Argilosa

MO = matéria orgânica. CTC = Capacidade de troca catiônica. SB = Soma de bases. V = Saturação por bases. ⁽¹⁾Raij et al. (2001). ⁽²⁾Teixeira et al. (2017).

Cada unidade experimental foi constituída por 3,5 m de largura e de 10 metros de comprimento, totalizando 35 m² por parcela. A área útil da parcela para as avaliações foi constituída pelas três linhas centrais, sendo eliminados como bordadura 2,5 m de cada extremidade.

Como plantas-teste, no sistema de cultivo I (C I), foram cultivadas as culturas de soja (*Glycine max* L.) na primeira safra e de milho (*Zea mays* L.) e feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) na segunda safra. Como plantas de cobertura foram cultivados o capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) e a aveia preta (*Avena strigosa* L.). No sistema de cultivo II (C II), foram

cultivadas as culturas de arroz (*Oryza sativa* L.) na primeira safra, feijão e milho na segunda safra e um mix de plantas de cobertura sendo cultivado nabo forrageiro, crotalária e milheto (Figura 5). As plantas foram cultivadas pelo período de 60 dias após a emergência (DAE).

Antes das aplicações de CLE e da semeadura das culturas nas safras dos anos I, II e IV, foram realizadas dessecações das áreas e uma operação com o implemento agrícola Triton. O fertilizante orgânico foi aplicado a lanço nas parcelas em área total, de forma manual e sem incorporação, levando-se em conta a umidade do material (Tabela 2). No presente estudo, estão sendo apresentadas as produções de biomassa e produtividade das culturas cultivadas do V ao VI ano agrícola. No ano agrícola 2022/23 (ano V), visando avaliar o efeito residual das aplicações do CLE, não foi realizada aplicação do fertilizante orgânico. Para a semeadura da soja, utilizou-se uma semeadora-adubadora de precisão de sete linhas com espaçamento de 0,50 m, com população de 320 mil plantas por ha, conforme a recomendação para a cultura. As adubações de semeadura e cobertura para a cultura foram realizadas somente nas parcelas do tratamento com MF, conforme as recomendações de Cantarella et al. (2022) e Raij et al (1997). Na adubação de semeadura foram fornecidos 30 kg ha⁻¹ de N (via ureia) e 40 kg ha⁻¹ de K₂O (via cloreto de potássio). Na adubação de cobertura, realizada após 30 DAE, aplicou-se (única aplicação) 40 kg ha⁻¹ de K₂O (via KCl) (Cantarella et al., 2022; Raij et al., 1997). A aplicação de cobertura foi realizada distribuindo-se o fertilizante sobre a superfície do solo, sem incorporação, ao lado das linhas de semeadura. A irrigação (pivô central) e o manejo fitossanitário da soja foram realizados de acordo com a necessidade e as recomendações técnicas para a cultura na região.

2.5. Variáveis avaliadas

2.5.1. Amostragem e preparo das amostras de terra

Anteriormente ao cultivo da cultura da soja (ano V), foram realizadas coletas do solo nas camadas de 0–0,1 m e 0,1–0,2 m de profundidade, com o auxílio de um trado holandês. Nestas amostras foram avaliados os indicadores físicos, químicos e biológicos. A coleta dessas amostras foi realizada dentro da

área útil de cada parcela. Para os indicadores físicos, foram coletadas quatro amostras de solo (indeformadas) por parcela, com o auxílio de anéis volumétricos ($\sim 90 \text{ cm}^3$). Para avaliação dos indicadores químicos e biológicos, foram coletadas seis subamostras (deformadas) por parcela, aleatoriamente, para compor uma amostra composta. Essas amostras foram retiradas com o auxílio de um trado tipo holandês e, na sequência, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas em câmara seca até o momento das análises.

2.5.2. Indicadores físicos de qualidade do solo

Os indicadores físicos avaliados no presente estudo foram: densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência a penetração (Teixeira et al., 2017). Para avaliar o volume total de poros (VTP), densidade do solo (D_s), macroporos e microporos, as amostras indeformadas foram saturadas em bandejas plásticas com água destilada até a altura aproximada de três 4^{os} do cilindro, por um período de 24 h. Em seguida, foram submetidas à tensão de 6,0 kPa na mesa de tensão, para o cálculo da microporosidade (MIP). A densidade do solo (D_s) foi obtida pelo método do anel volumétrico (Blake; Hartge, 1986). O volume total de poros foi calculado pela equação 1:

$$VTP = 100 \times (1 - DS/Dp) \dots\dots\dots \text{equação 1}$$

onde: DS corresponde a densidade do solo e DP corresponde a densidade de partícula; e a macroporosidade, obtida pela diferença entre VTP (calculada) e MIP (Tormena et al., 1998).

2.5.3. Indicadores químicos de qualidade do solo

Os indicadores químicos pH e CTC e os teores de K, P e Zn, foram avaliados seguindo a metodologia proposta por Raij et al. (2001). Os valores de pH foram determinados potenciométricamente em suspensões de terra fina seca ao ar (TFSA) em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ na proporção solo-solução de 1:2,5. A acidez potencial ($H+Al$) foi estimada pelo método do pH SMP. A partir

dos teores de Ca, Mg e K e da acidez potencial, foram calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0. O K trocável e o P foram extraídos também por resina, sendo determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria. Os teores disponíveis de Zn no solo foram obtidos por meio do extrator químicos DTPA em pH 7,3 e quantificação por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP–OES).

2.5.4. Indicadores biológicos de qualidade do solo

Os indicadores biológicos avaliados neste estudo foram a taxa respiratória do solo (C-CO₂), C da biomassa microbiana (MBC) C (C Total), N (N Total) e C/N (C/N Total), as atividades enzimáticas da arylsulfatase (ciclo do S), β -glucosidase (ciclo do C), fosfatase ácida do solo (ciclo do P) e o teor de glomalina facilmente extraível do solo (EEG).

A quantificação do C-CO₂ liberado seguiu a metodologia de Mercante et al. (2008). Os frascos foram fechados hermeticamente com plástico filme e vedados com tampa e fita isolante, pelo período de incubação de sete dias. A titulação da base livre permitiu calcular, por subtração, a quantidade de CO₂ que reage com NaOH (Anderson; Domsch, 1989). A determinação do C da biomassa microbiana (MBC) foi realizada pelo método de fumigação-extração (Vance; Brookes; Jenkinson, 1987), com leitura em espectrofotômetro (Silva et al., 2016). O C foi determinado por leitura de absorbância em espectrofotômetro, em comprimento de onda de 495 nm, sendo feita a comparação entre as amostras fumigadas e não fumigadas.

Para a determinação das atividades das enzimas arylsulfatase, β -glucosidase e fosfatase ácida do solo, foram utilizados os métodos descritos por Tabatabai (1994). Esta avaliação é baseada na determinação colorimétrica do composto *p*-nitrofenol que é formado após a adição dos substratos específicos para cada enzima, apresentando coloração amarela. O teor total de C e N foram determinadas utilizando-se o método de combustão a seco (Nelson and Sommers, 1996), por meio de um analisador elementar de C e N (LECO CN-2000, St. Joseph, Mi, USA). A glomalina facilmente extraível (EEG), obtida a partir da extração em autoclave, utilizando-se 1 g de solo e 8 mL de solução citrato de sódio 20 mM, pH 7,4, a uma temperatura de 121 °C por 30

min. A quantificação da glomalina foi realizada pelo método Bradford (1976) modificada por Wright et al (1996).

2.5.3 Produção de biomassa e produtividade de grãos

Aos 60 DAE das plantas de cobertura, foi realizado a coleta da parte aérea em seis pontos dentro da área útil das parcelas, aleatoriamente, o mais rente possível do solo e com o auxílio de um quadrado de ferro de 0,25 m². As amostras foram lavadas em água corrente, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa com circulação forçada de ar, mantida a 65 °C por 72 h, para obtenção da produção de massa seca por hectare. Para estimar a produtividade de grãos de soja, todas as plantas da área útil da parcela foram colhidas manualmente, trilhadas mecanicamente, pesadas, e posteriormente, realizados os cálculos com extrapolação para kg ha⁻¹ e corrigidos para o teor de 13% de umidade.

2.6. Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5%. Após atender às hipóteses de normalidade, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste Tukey ($P \leq 0,05$), nos casos em que o teste F for significativo. A análise de correlação foi realizada por meio da análise de Pearson. A análise estatística foi realizada por meio do software R (R Core Team, 2024).

3. RESULTADOS

3.1 Indicadores físicos de qualidade do solo

Em comparação ao 'mix', o cultivo solteiro de capim-marandu incrementou a MIP do solo na profundidade de 0,1–0,2 m em 2,9% (Tabela 3). No desdobramento das interações, em relação ao tratamento controle (sem adubação), o 'mix' associado ao residual de 30 t ha⁻¹ CLE incrementou a MAP e a PT do solo em 116,7% e 12,2%, respectivamente, na profundidade de 0–0,1 m (Figuras 8a e 8d). A combinação desses manejos também reduziu a DS em 0–0,1 m e a RSP nas duas profundidades em 15,7%; 39,2 e 25,4%, respectivamente (Figuras 8g e 8h).

Tabela 3. Efeito dos tratamentos nos indicadores físicos de qualidade do solo (MAP: Macroporosidade do solo MIP: Microporosidade do solo; PT: Porosidade total do solo; DS: Densidade do solo; RSP: Resistência do solo a penetração), nas profundidades de 0–0,1 e 0,1–0,2 m ($n = 4$).

Tratamentos	MAP		MIP		PT		DS		RSP	
	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,1 m	0,1-0,2 m
	m³ m⁻³						kg dm⁻³		Mpa	
Adubação										
Controle	0,06 c	0,04 b	0,34 a	0,35 a	0,41 c	0,40 a	1,54 a	1,60 a	0,78 a	2,76 a
FM	0,08 b	0,04 b	0,35 a	0,35 a	0,44 ab	0,40 a	1,45 ab	1,52 a	0,76 ab	2,55 ab
15 Mg ha⁻¹ de CLE	0,07 bc	0,05 b	0,34 a	0,35 ab	0,42 bc	0,40 a	1,44 b	1,55 a	0,67 bc	2,55 ab
30 Mg ha⁻¹ de CLE	0,101 a	0,07 a	0,35 a	0,32 b	0,46 a	0,39 a	1,39 b	1,45 a	0,61 c	2,37 b
Cultivo										
C I	0,05 b	0,05 a	0,37 a	0,35 a	0,42 b	0,40 a	1,48 a	1,54 a	0,72 a	2,50 a
C II	0,10 a	0,05 a	0,33 b	0,34 b	0,44 a	0,39 a	1,44 a	1,52 a	0,69 a	2,61 a
Teste F										
Adubação (A)	13,50**	8,59**	1,27 ^{NS}	4,50*	10,94**	2,56 ^{NS}	6,20**	2,13 ^{NS}	10,07**	6,63**
Cultivo (C)	91,65**	2,70 ^{NS}	33,26**	6,31*	4,71*	0,33 ^{NS}	2,57 ^{NS}	0,30 ^{NS}	1,42 ^{NS}	3,13 ^{NS}
(A) x (C)	6,39**	6,15**	3,53*	1,18 ^{NS}	7,65**	5,90**	4,06*	0,92 ^{NS}	13,24**	9,42**
Média Geral	0,07	0,05	0,35	0,34	0,43	0,402	1,46	1,53	0,70	2,56
CV (%)	17,18	22,67	4,48	5,45	4,99	5,60	4,82	7,58	9,85	6,86

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. CV% = Coeficiente de variação. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja), Controle = Sem aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos, FM = adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CV = Coeficiente de variação. CLE = Composto de lodo de esgoto – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2020b). Ano V = Três aplicações de CLE, totalizando 15 e 30 t ha⁻¹ (base úmida). Todos os tratamentos receberam aplicação de calcário e gesso agrícola.

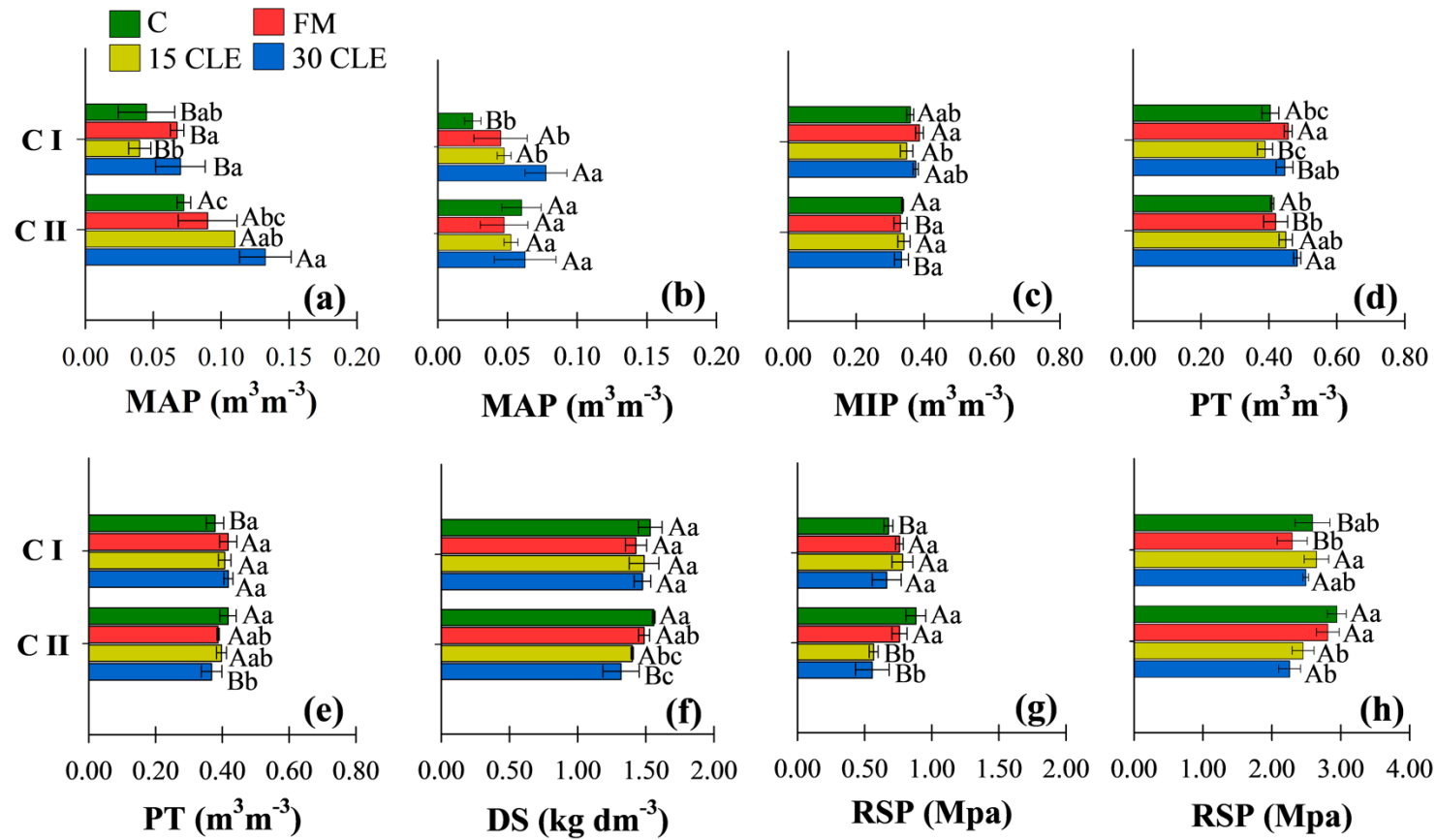


Figura 8. Respostas entre cultivos e manejos de adubação para (a) MAP 0–0,1 m; (b) MAP 0,1–0,2 m; (c) MIP 0–0,1 m; (d) PT 0–0,1 m; (e) PT 0,1–0,2 m; (f) DS 0–0,1 m; (g) RSP 0–0,1 m; (h) RSP 0,1–0,2 m. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos C I e C II e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja. MAP = Macroporosidade do solo, MIP = Microporosidade do solo, PT = Porosidade total do solo, DS = densidade do solo, RSP = Resistência do solo a penetração. C = Controle, FM = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b).

3.2 Indicadores químicos de qualidade do solo

Em comparação ao tratamento controle, a FM e o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementaram o teor de P nas duas profundidades. Em 0–0,1 m, os incrementos foram de 403,4 e 448,6%, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 4). Contudo, em 0,1–0,2 m os incrementos observados para este indicador foram de 439,0% para FM e 341,5% para o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE (Tabela 4).

Em relação ao K em 0–0,1 m, comparando-se ao tratamento controle, os incrementos foram de 65,0% para a FM e de 51,0% para o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE (Tabela 4). O residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou o pH e a CTC nas duas profundidades (Tabela 4). Comparando-se ao controle, os incrementos foram de 8,6% e 4,7% para o pH e 28,3% e 15,6% para a CTC (Tabela 4). Em 0,1–0,2 m o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou o teor de Zn em 241,3%. Na mesma profundidade em relação ao cultivo solteiro de capim-marandu, o cultivo 'mix' incrementou o teor de Zn em 58,9% (Tabela 4).

Em relação ao cultivo solteiro de capim-marandu o cultivo 'mix' também incrementou o P nas duas profundidades. Os incrementos foram de 59,2% em 0–0,1 m e de 73,7% em 0,1–0,2 m (Tabela 4).

Tabela 4. Efeito dos tratamentos nos indicadores químicos do solo: teores de P, K, Zn pH e capacidade de troca de cátions (CTC) nas profundidades de 0–0,1 e 0,1–0,2 m ($n = 4$).

Tratamentos	P		K		Zn		pH _{CaCl2}		CTC	
	0–0,1 m	0,1–0,2 m	0–0,1 m	0,1–0,2 m	0–0,1 m	0,1–0,2 m	0–0,1 m	0,1–0,2 m	0–0,1 m	0,1–0,2 m
	—— mg dm ⁻³ ——		—— mmol _c dm ⁻³ ——		—— mg dm ⁻³ ——				—— mmol _c dm ⁻³ ——	
<i>Adubação</i>										
Controle	6,50 c	4,87 c	1,00 b	1,18 a	1,23 c	1,04 c	5,47 bc	5,54 ab	57,12 c	56,81 b
FM	32,72 a	26,25 a	1,65 a	1,36 a	4,37 ab	2,70 ab	5,25 c	5,07 b	62,16 bc	58,11 ab
15 t ha ⁻¹ de CLE	20,97 b	13,75 b	1,37 ab	1,13 a	3,73 b	2,56 b	5,70 ab	5,52 ab	66,95 b	61,76 ab
30 t ha ⁻¹ de CLE	35,66 a	21,50 ab	1,51 a	1,33 a	4,78 a	3,55 a	5,94 a	5,80 a	73,31 a	65,71 a
<i>Cultivo</i>										
C I	18,49 b	12,12 b	1,30 a	1,14 a	2,92 b	1,90 b	5,51 a	5,35 a	64,56 a	60,89 a
C II	29,43 a	21,06 a	1,46 a	1,36 a	4,14 a	3,02 a	5,66 a	5,61 a	65,20 a	60,30 a
<i>Teste F</i>										
Adubação (A)	61,02**	18,17**	8,46**	0,41 ^{NS}	83,40**	21,96**	12,64**	5,65**	22,42**	3,27*
Cultivo (C)	41,56**	16,57**	2,64 ^{NS}	1,71 ^{NS}	48,94**	24,86**	3,00 ^{NS}	4,09 ^{NS}	0,19 ^{NS}	0,07 ^{NS}
(A) x (C)	2,23 ^{NS}	1,19 ^{NS}	0,52 ^{NS}	0,07 ^{NS}	3,21*	2,01 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,44 ^{NS}	1,00 ^{NS}	0,31 ^{NS}
Média Geral	23,96	16,59	1,38	1,25	3,53	2,64	5,59	5,48	64,88	60,60
CV (%)	20,00	37,42	19,65	38,73	13,94	25,62	4,20	6,53	6,35	10,33

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. CV% = Coeficiente de variação, CTC = Capacidade de troca de cátions, Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja, Controle = Sem aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos, FM = adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CV = Coeficiente de variação. CLE = Composto de lodo de esgoto – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b), Ano V = Três aplicações de CLE, totalizando 15 e 30 t ha⁻¹ (base úmida). Todos os tratamentos receberam aplicação de calcário e gesso agrícola.

No desdobramento da interação, a combinação do cultivo 'mix' associado ao residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou o teor de Zn (5,37 mg dm⁻³) em 0–0,1 m (Figura 9).

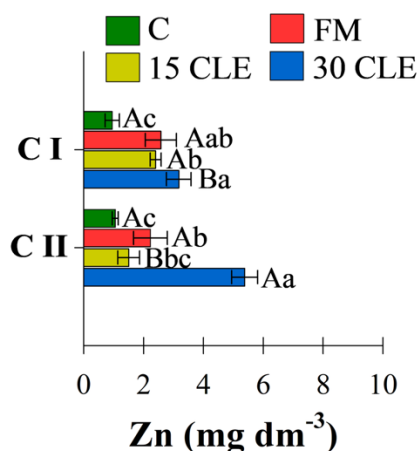


Figura 9. Resposta entre cultivos e manejos de adubação para os teores de Zn no solo na profundidade de 0,0–0,1 m. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, FM = Fertilização mineral – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b).

3.2 Indicadores biológicos de qualidade do solo

Os indicadores biológicos responderam aos manejos de adubação e plantas de cobertura. O residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou o C total nas duas profundidades e o N total em 0,1–0,2 m (Tabela 5). Em relação ao tratamento sem adubação, os incrementos no C total foram de 15,3% em 0–0,1 m e 5,1% em 0,1–0,2 m (Tabela 5). Para o N total, o incremento foi de 11,7% (Tabela 5).

Em relação ao tratamento controle, o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou a atividade enzimática da arylsulfatase em 11,7% na na profundidade de 0–0,1 m (Tabela 5). Em relação ao cultivo solteiro do capim-marandu, o 'mix' incrementou a atividade da arylsulfatase em 26,6% e a β -glucosidase em 17,0% (Tabela 5).

Tabela 5. Efeito dos tratamentos sobre os indicadores biológicos do solo: Taxa respiratória do solo (C-CO₂), C-Biomassa microbiana (MBC), C Total, N Total, C/N Total, atividade enzimática da arylsulfatase, β -glucosidase, Fosfatase Ácida e teor de glomalina facilmente extraível do solo (EEG) nas profundidades de 0–0,1 e 0,1–0,2 m ($n = 4$).

Tratamentos	C-CO ₂		MBC		C Total		N Total		C/N Total		Arylsultase		β–glucosidase		Fosfatase Ácida		EEG	
	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2	0-0,1	0,1-0,2
	µg C–CO ₂ g ⁻¹ solo		µg MBC g ⁻¹ solo		%		%		%		mg p–nitrofenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹		mg g ⁻¹ solo					
Adubação																		
Controle	31,87 a	34,31 a	75,45 a	79,00 a	1,83 b	1,77 ab	0,39 a	0,34 ab	4,69 a	4,95 a	30,03 b	30,80 a	58,42 a	50,74 a	22,90 a	21,17 a	2,42 b	2,46 a
FM	29,62 a	27,43 b	29,58 b	48,32 b	1,87 ab	1,62 b	0,38 a	0,31 b	4,91 a	4,99 a	37,53 ab	23,10 b	72,18 a	48,96 a	16,81 b	17,66 b	2,62 a	2,39 b
15 t ha ⁻¹ de CLE	33,87 a	30,87 ab	67,09 a	52,24 b	1,82 b	1,69 b	0,38 a	0,36 ab	4,92 a	4,71 a	38,48 ab	29,25 a	66,67 a	48,26 a	21,28 a	18,05 b	2,60 a	2,50 a
30 t ha ⁻¹ de CLE	35,87 a	27,81 b	21,74 b	51,32 b	2,11 a	1,86 a	0,43 a	0,38 a	4,87 a	4,81 a	45,32 a	33,62 a	73,53 a	57,90 a	18,22 b	18,31 b	2,61 a	2,46 b
Cultivo																		
C I	32,21 a	28,06 b	72,85 a	83,65 a	1,89 a	1,76 a	0,39 a	0,36 a	4,83 a	4,91 a	33,40 b	23,57 b	61,82 b	49,25 a	19,85 a	17,61 b	2,45 b	2,39 b
C II	33,40 a	32,15 a	24,08 b	31,79 b	1,93 a	1,70 a	0,40 a	0,34 a	4,87 a	4,82 a	42,29 a	34,81 a	73,57 a	53,68 a	19,76 a	19,98 a	2,67 a	2,51 a
Teste F																		
Adubação (A)	1,61 ^{NS}	7,38 [*]	30,74 ^{**}	10,66 ^{**}	4,52 [*]	5,84 ^{**}	1,22 ^{NS}	3,46 [*]	0,36 ^{NS}	0,31 ^{NS}	5,06 ^{**}	6,97 ^{**}	1,82 ^{NS}	1,92 ^{NS}	19,86 ^{**}	5,29 ^{**}	44,71 ^{**}	13,29 ^{**}
Cultivo (C)	0,32 ^{NS}	4,50 [*]	102,15 ^{**}	140,52 ^{**}	0,37 ^{NS}	2,17 ^{NS}	0,21 ^{NS}	0,69 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,12 ^{NS}	10,21 ^{**}	44,44 ^{**}	5,32 [*]	1,93 ^{NS}	40,89 ^{NS}	11,48 ^{**}	230,44 ^{**}	98,81 ^{**}
(A) x (C)	1,99 ^{NS}	4,88 ^{**}	20,47 ^{**}	20,24 ^{**}	0,12 ^{NS}	0,25 ^{NS}	0,49 ^{NS}	0,36 ^{NS}	0,49 ^{NS}	0,07 ^{NS}	2,89 ^{NS}	5,47 ^{**}	0,23 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,02 ^{NS}	4,77 [*]	21,43 ^{**}	14,81 ^{**}
Média Geral	32,81	30,10	48,47	57,72	1,91	1,73	0,40	0,35	4,85	4,87	37,84	29,19	67,70	51,46	19,80	18,80	2,56	2,45
CV (%)	18,21	14,15	28,15	21,43	9,22	6,89	14,55	13,16	10,36	13,56	20,78	16,32	21,27	17,48	8,92	10,50	1,57	1,36

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. CV% = Coeficiente de variação. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja. Cultivo II (C II) = II. Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalaria e milheto/soja). Controle = Sem aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos. FM = adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CV = Coeficiente de variação. CLE = Composto de lodo de esgoto – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b). Ano V = Três aplicações de CLE, totalizando 15 e 30 t ha⁻¹ (base úmida). Todos os tratamentos receberam aplicação de calcário e gesso agrícola.

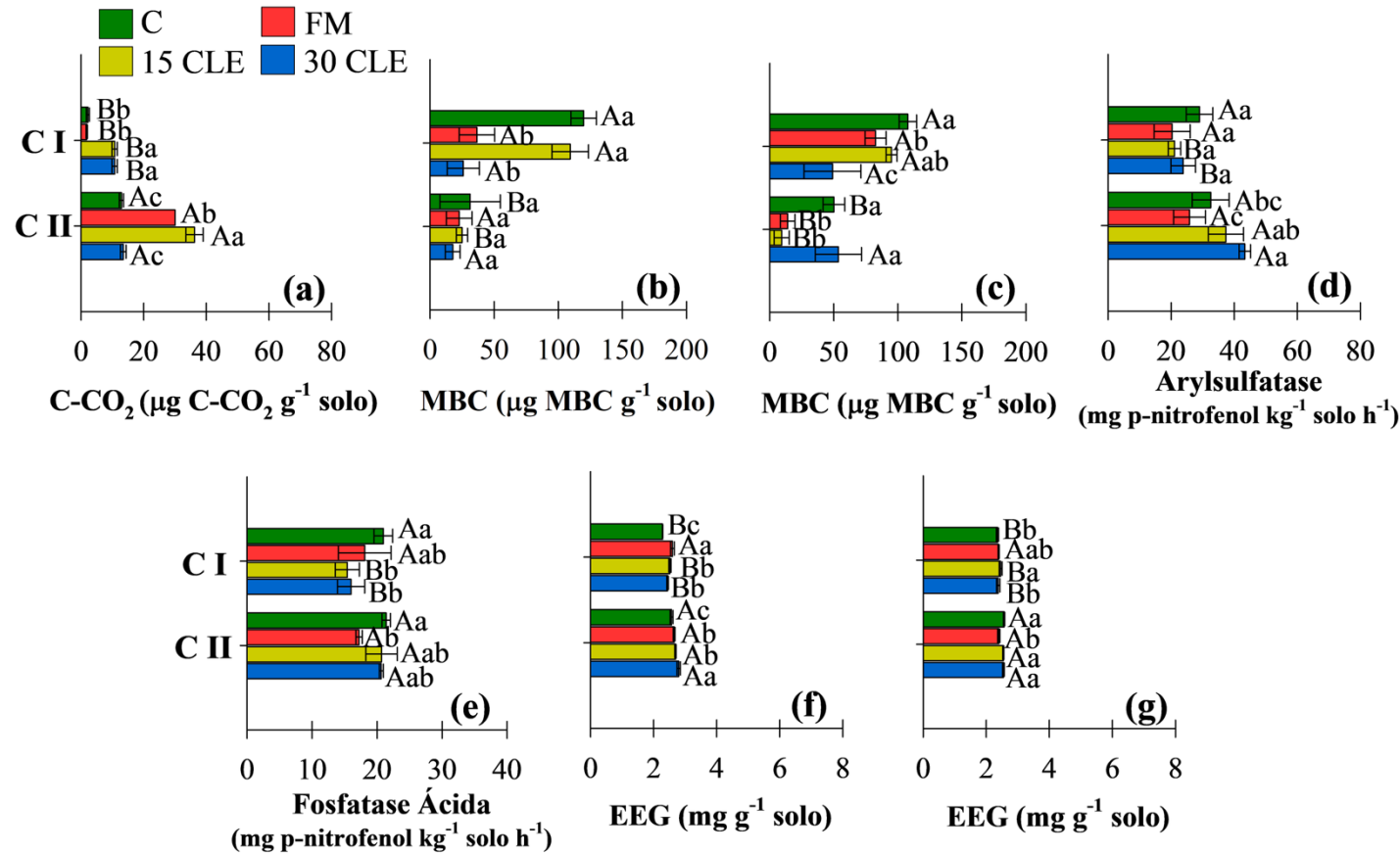


Figura 10. Interações entre cultivos e manejos de adubação para (a) C-CO₂ 0,1–0,2 m; (b) MBC 0–0,1 m; (c) MBC 0,1–0,2 m; (d) Arylsulfatase 0,1–0,2 m; (e) Fosfatase Ácida 0,1–0,2 m; (f) EEG 0–0,1 m; (g) EEG 0,1–0,2 m. Médias seguídas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, FM = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b).

Para o desdobramento das interações, em relação ao tratamento controle, a combinação do 'mix' com o residual de 15 t ha⁻¹ de CLE incrementou a taxa respiratória do solo na profundidade de 0,1–0,2 m em 111,1% (Figura 10a). Enquanto o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE associado ao cultivo 'mix' incrementou em 34,4% a atividade enzimática da arylsulfatase em 0,1–0,2 m e 8,7% o teor de EEG em 0–0,1 m (Figura 10d; Figura 10f).

3.2 Produção de biomassa das plantas de cobertura e produtividade de soja

A adubação FM incrementou a biomassa seca do capim-marandu, sem diferir dos tratamentos com CLE (Tabela 6). Em relação ao tratamento controle, o incremento foi 94,5% (Tabela 6). A biomassa seca do 'mix' também respondeu positivamente aos tratamentos de adubação. Em relação ao tratamento controle, o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou a biomassa do 'mix' em 42,7% (Tabela 6).

Tabela 6. Efeito dos tratamentos sobre a biomassa seca de plantas de cobertura e produtividade de soja ($n = 4$).

Tratamentos	Capim-marandu	Mix	Soja
	kg ha ⁻¹		
<i>Adubação</i>			
Controle	648 b	7335 b	4869 b
FM	1261 a	8265 ab	5342 ab
15 t ha ⁻¹ de CLE	958 ab	8725 ab	5641 a
30 t ha ⁻¹ de CLE	765 ab	10466 a	5786 a
<i>Cultivo</i>			
C I	-	-	5039 b
C II	-	-	5780 a
<i>Teste F</i>			
Adubação (A)	4,84*	3,62*	6,44**
Cultivo (C)	-	-	21,61**
(A) x (C)	-	-	3,95*
Média Geral	908	8698	5410
CV (%)	26,80	15,86	8,34

** e * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. CV% = Coeficiente de variação. Capim-marandu = *Urochloa brizantha* cv. Marandu, Mix = Milheto (*Penisetum glaucum* L.) + Crotalaria Juncea (*Crotalaria juncea* L.) + Nabo Forrageiro (*Raphanus sativus* L.), Soja cv. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja. Cultivo II (C II) = II. Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalaria e milho/soja. Controle = Sem aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos. FM = adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CV = Coeficiente de variação. CLE = Composto de lodo de esgoto – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b).

No desdobramento da interação a combinação do 'mix' com o residual de 15 t ha⁻¹ de CLE incrementou a produtividade de grãos de soja (6297 kg ha⁻¹) (Figura 11). Em comparação ao 'mix', sem adubação (5487 kg ha⁻¹) e 'mix' + FM (5351 kg ha⁻¹), os incrementos foram de 14,7% e 17,6%, respectivamente (Figura 11).

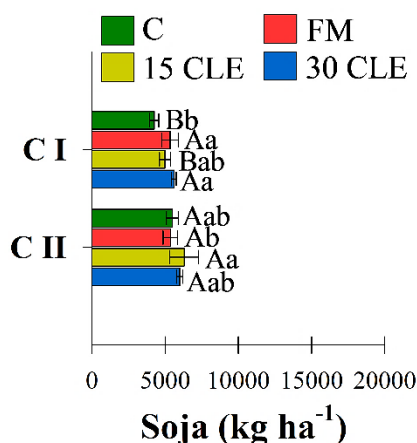


Figura 11. Interações entre cultivos e manejos de adubação para a produtividade de grãos de Soja. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz de terras altas/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, MF = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020b).

3.3 Correlação entre os indicadores e a produtividade de grãos de soja

As correlações positivas observadas para a profundidade de 0–0,1 m foram: P x PROD ($r = 0,68$; $p < 0,0001$); EEG x PROD ($r = 0,64$; $p < 0,0001$); P x EEG ($r = 0,71$; $p < 0,0001$); MAP x EEG ($r = 0,74$ $p < 0,0001$); PT x EEG ($r = 0,50$; $p = 0,001$); CT x EEG ($r = 0,41$; $p = 0,020$) (Figura 12a). As correlações negativas observadas para a profundidade de 0–0,1 m foram: MBC x K ($r = -0,71$; $p < 0,0001$); MBC x PROD ($r = -0,66$; $p < 0,0001$); MBC x P ($r = -0,75$; $p < 0,0001$); MBC x Zn ($r = -0,86$; $p < 0,0001$) (Figura 12b).

Na profundidade de 0,1–0,2 m observou-se a correlação positiva P x PROD ($r = 0,60$; $p = 0,005$) (Figura 12b) e as correlações negativas PROD x MBC ($r = -0,60$ $p = 0,0006$); P x MBC ($r = -0,65$; $p < 0,0001$); Zn x MBC ($r = -0,60$; $p = 0,0002$) (Figura 12b).

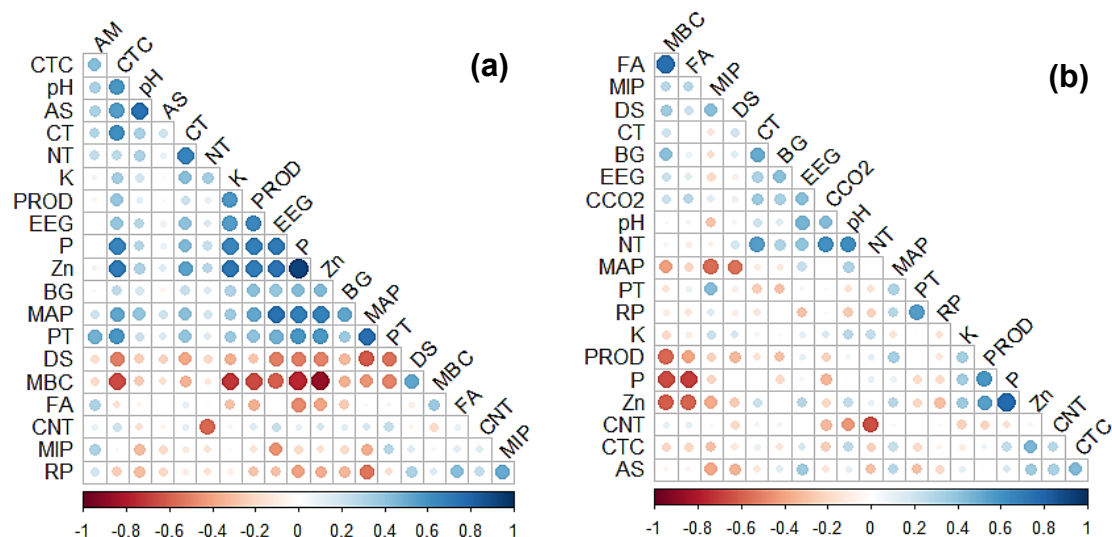


Figura 12. Correlação de Pearson entre os indicadores e produtividade de soja na profundidade de 0–0,1 m (a) e 0,1–0,2 m (b). Indicadores físicos: MAP (Macroporosidade do solo), MIP (Microporosidade do solo), PT (Porosidade total do solo), DS (Densidade do solo), RP (Resistência do solo a penetração). Indicadores químicos: P (Fósforo), K (Potássio), Zn (Zinco), CTC (Capacidade de troca de cátions) e pH. Indicadores biológicos: MBC (Caborno da biomassa microbiana), AM (Atividade microbiana), EEG (Glomalina facilmente extraível), CT (Carbono total), NT (Nitrogênio total), CNT: Relação C/N total, AS: Arylsulfatase, BG: β -glucosidase, FA: Fosfase Ácida. PROD: Produtividade de grãos de soja. Cor azul indica correlação positiva e vermelho indica correlação negativa.

4. DISCUSSÃO

4.1 Indicadores físicos de qualidade do solo

Os benefícios do cultivo de plantas de cobertura sobre os indicadores físicos do solo em diferentes profundidades, podem ser atribuídos a diversos aspectos, dentre estes, as espécies e a forma como estas são utilizadas (solteiras ou combinadas em mix), período de cultivo, condições ambientais e climáticas, o tipo de solo, a biomassa produzida ao final do cultivo e o ao manejo de adubação (Cherubin et al., 2016; Çerçioğlu; Udawatta; Anderson, 2025).

A arquitetura do sistema radicular das plantas, especialmente das que possuem raízes pivotantes, contribuíram para os incrementos na porosidade, assim como a redução da densidade e resistência do solo a penetração (Tabela 3; Figuras 8a e 8d). Essas raízes desempenham um papel crucial na biodescompactação e no aumento da porosidade do solo, principalmente por meio da formação de bioporos, gerados pela decomposição do sistema radicular, proporcionando um ambiente físico adequado para o crescimento das culturas

subsequentes (Adetunji et al., 2020; Ogilvie et al., 2021). Sabe-se que a rotação e a diversificação no cultivo de plantas, beneficiam não somente a estrutura e porosidade nas primeiras profundidades, mas também a resistência do solo a penetração (Mondal; Chakraborty, 2022). Esses resultados positivos tendem a ser ainda mais expressivos quando este manejo é associado a maior disponibilidade de nutrientes no solo. Neste sentido, ficou evidente que o fertilizante orgânico CLE também contribuiu para o melhor desenvolvimento das plantas de cobertura, proporcionando efeitos na saúde física do solo.

Pesquisadores avaliando o efeito da aplicação de lodo de esgoto e/ou adubação mineral, associado ao cultivo de capim-marandu por quatro anos em um Latosolo degradado, não observaram variação na MIP do solo, contudo, foi observado aumento na PT nos tratamentos que receberam o LE (Bonini et al., 2015). Em outro estudo, avaliando o efeito da aplicação de lodo de esgoto sob os atributos físicos do solo na profundidade de 0,1–0,2 m, foi observado incrementos para a MIP e PT do solo (Maia et al., 2018). Estes resultados indicam que a adição de material orgânico ao solo, em função do cultivo de plantas de cobertura e/ou os manejos de adubação, contribuem para melhorar os indicadores físicos nas profundidades iniciais, beneficiando os cultivos em sucessão e contribuindo para melhorar a saúde do solo.

A faixa adequada para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, facilitando o crescimento de plantas, é aproximadamente 0,500 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para PT, entre 1,1 a 1,6 kg dm^{-3} para DS e $\leq 2,00$ Mpa para RSP (Kiehl 1979; Carvalho et al., 2020). Embora existam poucos estudos à longo prazo sobre os benefícios do CLE combinado com o manejo de plantas de cobertura nos indicadores físicos, os resultados obtidos após cinco anos de cultivo evidenciaram que a porosidade e a densidade estão próximas da faixa adequada para o cultivo de plantas. Contudo, a RSP está acima ($\geq 2,00$ Mpa) desta faixa na profundidade de 0,1–0,2 m.

Apesar da redução da RSP na profundidade de 0,1–0,2 m para combinação do CLE + 30 t ha^{-1} de CLE, a restrição de água e as altas temperaturas registradas ao longo do ano IV (Figura 6), impactaram negativamente o desempenho do CLE e das plantas de cobertura, levando a menores incrementos no efeito residual sob a RSP na profundidade de 0,1–0,2

m no ano V. Além da disponibilidade hídrica e das elevadas temperaturas, o curto período de implantação do SPD e a rotação de culturas (iniciada no ano III) também contribuíram nas respostas dos manejos sob os indicadores físicos. Estudos de longo prazo sobre o uso de plantas de cobertura confirmam melhores respostas nos indicadores físicos (Blanco-Canqui et al., 2023; Blanco-Canqui; Ruis, 2020), enquanto nos efeitos de curto prazo as contribuições são menos evidentes (Blanco-Canqui, 2023). Contudo, os resultados deste estudo demonstraram que, apesar do pouco tempo, o residual de três aplicações de CLE combinadas com plantas de cobertura, especialmente o mix, melhoram os indicadores físicos nas profundidades iniciais do solo para cultivos agrícolas na região do Cerrado.

4.2 Indicadores químicos de qualidade do solo

Os cultivos e/ou manejos de adubação incrementaram os indicadores químicos de saúde do solo nas duas profundidades (Tabela 3; Figuras 8a-h). Assim como observado no presente estudo, o aumento no valor de pH do solo em função da adição de CLE também vem sendo reportado na literatura.

Prates et al. (2022) observaram incremento no pH do solo em uma sucessão milho/soja, na profundidade de 0–0,2 m. Os autores relatam incremento neste indicador quando houve aplicação de 15 t ha⁻¹ de CLE em área total (de 4,5 para 5,5). Em outro estudo, Silva et al. (2022) também observaram incrementos nos valores de pH em um solo sob cultivo de cana-de-açúcar em resposta ao aumento de doses de CLE. Os autores relatam que aplicação de 7,5 t ha⁻¹ de CLE incrementou esse indicador de 5,2 para 5,9 na profundidade de 0–0,25 m. Estes resultados se assemelham aos observados no presente estudo, quando houve o fornecimento de 30 t ha⁻¹ de CLE.

Tal fato está relacionado ao caráter anfótero da matéria orgânica adicionada ao solo via CLE. Quando a MO está presente no solo com alta concentração de íons H⁺, esta age como uma base, adsorvendo temporariamente esses íons e resultando no aumento do pH do solo. Esse comportamento químico do indicador também foi observado em um estudo realizado por Alves (2024). O autor relatou que a aplicação de 30 t ha⁻¹ de CLE

resultou em um aumento nos valores de pH nas profundidades de 0–0,2 m (de 4,5 para 5,8) e 0,2–0,4 m (de 4,7 para 5,6). De acordo com o autor, esse efeito foi atribuído à capacidade da MO presente no CLE de alterar temporariamente a reação do solo. Contudo, não se pode considerar este fertilizante como um corretivo da acidez do solo, pois os íons de hidrogênio retidos no coloide orgânico podem ser liberados, resultando no retorno da acidez ao solo. Assim, não é possível atribuir a esse fertilizante o caráter de corretivo da acidez, uma vez que os hidrogênios retidos no coloide orgânico podem aumentar novamente a acidez do solo.

Solos da região do Cerrado são altamente intemperizados, exibindo baixos teores disponíveis de nutrientes para o desenvolvimento vegetal, especialmente o P (Racena et al., 2022). Em função de sua composição mineralógica, parte dos fosfatos aplicados na forma de fertilizantes minerais no solo, podem ser rapidamente fixados, tornando-se indisponíveis para às plantas. Desta forma, a adoção de estratégias como a adubação orgânica associada a plantas de cobertura, podem contribuir para incrementar os teores disponíveis de P e outros nutrientes no solo.

Em um estudo a respeito da substituição parcial à longo prazo de fertilizantes minerais por resíduos culturais *in situ*, foi notado incrementos contínuos na fertilidade do solo em um experimento de 27 anos em um Antrossolo, na China subtropical (Chen et al., 2021). De acordo com esses autores, a substituição parcial, a longo prazo, de fertilizantes minerais por resíduos de culturas *in situ* assegurou a fertilidade do solo, contribuindo para incrementar as reservas de nutrientes. Alguns autores relatam que a aplicação de CLE associado ou não a adubação mineral convencional pode aumentar os teores de P, K e Zn no solo (Silva et al., 2022; Nascimento, 2024). Resultados semelhantes para o P e Zn também foi mencionado por Prates et al. (2022) para o cultivo de milho e por Oliveira et al. (2023) no cultivo de feijão-comum, no qual o fornecimento de CLE como fertilizante orgânico, elevou os teores destes nutrientes. Contudo, em relação ao K na profundidade de 0–0,1 m, a ausência de resposta do CLE em relação ao FM era esperada, uma vez que o fertilizante não apresenta elevados teores deste nutriente em sua composição (Tabela 2).

Dessa forma, para suprir a demanda de K pelas culturas, é recomendável o uso de outras fontes complementares (Nascimento, 2024).

Em relação ao teor de Zn, Prates et al (2022) e Oliveira et al (2023), demonstraram que os tratamentos com FM e o fornecimento de CLE não diferiram entre si, e que ambos incrementaram os teores de Zn no solo. Teores de Zn em solos paulistas acima de 1,2 mg dm⁻³ são considerados altos para o cultivo de espécies agrícolas (Boaretto et al., 2022). Neste estudo, após seis anos de cultivo, os teores de Zn aumentaram de 0,6 para 5,4 mg dm⁻³ por meio da combinação de plantas de cobertura e efeito residual de três aplicações do fertilizante orgânico (Tabela 4). O Zn é considerado um micronutriente de plantas e está presente em elevados teores no CLE (Prates et al., 2020). Embora requeridos em menores quantidades pelas plantas, quando em excesso, podem causar desarranjo funcional das células e redução na produtividade (Riva et al., 2019). Neste estudo, não foram detectados sintomas de fitotoxicidade, nem alterações funcionais ou fisiológicas que pudessem afetar o cultivo das plantas de cobertura ou a produtividade da soja. No entanto, são necessários estudos adicionais para compreender os efeitos a longo prazo do aumento dos teores de Zn nas funções ecossistêmicas do solo.

O aumento da CTC em função do residual da maior dose de CLE (Tabelas 5 e 6), pode estar relacionado ao efeito benéfico do fertilizante em aumentar os sítios de troca/adsorção no solo. Teressa et al. (2024), relataram que a aplicação de 15 t ha⁻¹ de um fertilizante orgânico a base de esterco animal, incrementou a CTC nas camadas iniciais de um Vertisol sob cultivo de milho. De acordo com autores, o fornecimento do fertilizante favoreceu o incremento da CTC em função do aumento nos teores dos cátions trocáveis como Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, incrementando o seu “reservatório” nutricional. O efeito da aplicação de fertilizantes orgânicos em solos de Cerrado é relatado por Silva et al. (2022) em estudo sobre o efeito da aplicação de CLE nas propriedades químicas do solo de um Latossolo Vermelho Distrófico, na profundidade de 0,1–0,2 m. Os resultados obtidos demonstraram que o CLE proporcionou melhorias nos indicadores químicos nas duas profundidades, contribuindo para o melhor desenvolvimento das culturas.

4.3 Indicadores biológicos de qualidade do solo

O residual de três aplicações do CLE e a diversificação de cultivos ao longo dos anos agrícolas, combinados ou não, incrementaram a atividade biológica do solo nas duas profundidades. O manejo de fertilizantes orgânicos à longo prazo na agricultura são relatados como melhoradores do aporte de C e N nas profundidades iniciais do solo (Huang et al., 2022; Hayatu et al., 2023). O CLE é um fertilizante rico em MO, C e N (Tabela 2). Neste estudo, mesmo a curto prazo (seis anos de cultivo e três anos sob SPD), foi possível notar que o fornecimento de CLE contribuiu diretamente para aumentar os teores de C e N nas profundidades iniciais do solo.

Ao estudar o efeito de um CLE proveniente de águas residuárias, pesquisadores relataram que a aplicação do adubo durante três anos consecutivos, antes do cultivo de batata no primeiro ano, trigo no segundo e cevada no terceiro, elevaram os teores de CT e NT do solo na profundidade de 0–0,6 m (Curci et al., 2020). No presente estudo a adoção do SPD e, conseqüentemente, da rotação de culturas a partir do ano III, facilitou a ciclagem e manutenção dos teores de CT e NT no solo para além da profundidade de 0–0,6 m (Tabela 5). Estes resultados indicam que a combinação destes manejos, ou seja, plantas de cobertura com fertilização orgânica, incrementam o CT e o NT em solos sob cultivo agrícola no Cerrado, sem a necessidade de aplicações consecutivas.

Os manejos que promoveram o aumento de CT e NT também influenciaram positivamente a atividade enzimática do solo. Semelhante à β -glucosidase, o 'mix' também estimulou a atividade da arylsulfatase em 0–0,1 m e quando combinado com o CLE, em 0,1–0,2 m. O aumento da atividade destas enzimas pode ser um indicativo de solo biologicamente ativo, com reações bioquímicas que favorecem as comunidades microbianas e o cultivo de plantas. A conversão de celobiose em glicose pela β -glucosidase e a liberação de SO_4^{2-} pela arylsulfatase auxiliam processos como a síntese de aminoácidos e a ciclagem de nutrientes (Carneiro et al. (2024). Em um estudo avaliando o efeito da inclusão de leguminosas como o feijão-guandú (*Cajanus cajan* L.), grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) e o feijão-moyashi (*Vigna radiata* L.) entre o cultivo de milho e soja, em comparação a sucessão milho/soja somente, a inclusão de

leguminosas em rotação, associadas a adubação orgânica, beneficiou a atividade das enzimas arylsulfatase e β -glucosidase em comparação com a rotação contínua milho (*Zea mays* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) (Borase et al. 2020); os autores ressaltaram a importância da diversificação e rotação de plantas no incremento da atividade enzimática do solo. Resultados semelhantes foram observados no presente estudo para a combinação do 'mix' com o residual de 30 t ha⁻¹. A adubação pode ter beneficiado o crescimento radicular destas plantas, resultando em um maior volume de raízes em 0,1–0,2 m, favorecendo a associação com microrganismos e as transformações biológicas nesta profundidade.

Em outro estudo, avaliando o efeito de espécies de plantas de cobertura em sistema de rotação, o cultivo de aveia+leguminosas e/ou brásicas, incrementaram a abundância de microrganismos e a atividade de enzimas na profundidade de 0,0–0,15 m, especialmente as associadas ao ciclo do C, como a β -glucosidase (Thapa et al., 2021). Resultados semelhantes foram observados neste estudo para o 'mix' de milheto+crotalária juncea+nabo forrageiro que favoreceram a atividade da β -glucosidase na 0–0,1 (Tabela 5).

As condições que favorecem a atividade enzimática no solo, também favorecem a atividade microbiana, como foi observado para o 'mix associado ao residual de 15 t ha⁻¹ de CLE, na profundidade de 0,1–0,2 m (Figura 10a). A quantificação do C oriundo da taxa respiratória dos microrganismos, que é liberado na forma CO₂, pode indicar ação microbiana na decomposição do material orgânico e, consequentemente, liberação de nutrientes. Este incremento pode estar relacionado a diversificação no cultivo e a exsudação radicular destas espécies, que podem conter açúcares, amino ácidos, enzimas e outras substâncias. Essa exsudação também pode favorecer a simbiose com fungos micorrízicos arbusculares e a síntese de glomalina facilmente extraível (EEG) no solo.

A EEG é sintetizada nas paredes celulares das hifas dos fungos micorrízicos arbusculares e contribuem para a formação e estabilização de agregados, além de terem um papel fundamental no armazenamento de C no solo (Hawkins et al, 2023). Balik et al (2022), verificaram que aplicação de lodo de esgoto e esterco bovino incrementaram os teores de glomalina no solo. Em

outro estudo, foi evidenciado que ambos os manejos de adubação mineral quanto orgânica incrementaram significativamente o teor de glomalina em comparação com o tratamento controle não adubado (Balik et al., 2020). Diferentes espécies em SPD podem contribuir para a manutenção do inóculo (hifas e esporos) de fungos micorrízicos autóctones, e desta forma contribuir para incrementar o teor EEG no solo. A glomalina representa uma reserva global significativa C e N orgânico no solo, representando aproximadamente de 3 a 5%, respectivamente, o aporte destes no solo (Sarapatka; Alvarado Solano; Cizmar, 2019). Além do aporte de C total e N total, o teor de glomalina foi incrementado pelo 'mix' associado ao residual do fertilizante orgânico.

4.4 Produção de biomassa das plantas de cobertura e produtividade de soja

Um dos desafios da agricultura na região de solos tropicais como o Cerrado, é a baixa fertilidade natural limitando a produtividade. Grande parte destes solos apresentam naturalmente menores quantidades de MOS e baixos teores disponíveis de nutrientes para o adequado desenvolvimento das plantas. Desta forma, o CLE pode ser uma fonte alternativa de nutrientes podendo complementar ou substituir parcialmente a adubação das culturas, além de aumentar a eficiência de uso dos FM.

Kawakami (2022) avaliando o efeito de doses de CLE em comparação a FM na produção de biomassa seca de capim-marandu, verificou maior aporte de biomassa seca no tratamento que recebeu apenas os insumos minerais. Resultados semelhantes ao da autora foram encontrados, sendo que os valores da produção de biomassa seca do capim encontrados no tratamento com FM foi superior ao resultado observado no tratamento controle e aos manejos com fornecimento de CLE. Diversos fatores como altas temperaturas associadas a longos períodos de estiagem, ou seja, baixa pluviosidade e consequentemente umidade no solo (Figura 6), além de ausência de uma boa regulação no equipamento de plantio e o uso de sementes com baixa taxa de germinação, são fatores que podem comprometer o desempenho do CLE no solo e, portanto, o crescimento e desenvolvimento de plantas, como foi observado para o capim-marandu.

A combinação de diferentes espécies combinadas na forma de mix, principalmente com espécies contrastantes, proporciona diversos benefícios ao solo e a cultura subsequente. O efeito residual da aplicação de 30 t ha⁻¹ de CLE exibiu a maior biomassa seca destas plantas (Tabela 8). Este resultado pode estar relacionado a maior disponibilidade de hídrica no ano V (Figura 6), contribuindo para maior germinação e crescimento inicial de plantas, refletindo em um maior aproveitamento do residual do CLE e, conseqüentemente, maior biomassa de plantas.

Em relação a produtividade de grãos de soja, Silva (2022) avaliando o efeito residual do CLE na rotação feijão/capim-marandu/soja sob SPD no Cerrado, relata incrementos na produtividade de grãos de soja com a adubação de 20 t ha⁻¹ (4574 kg ha⁻¹) seguido das doses de 10 t ha⁻¹ (4184 kg ha⁻¹) e 25 t ha⁻¹ (4162 kg ha⁻¹). Estes resultados foram semelhantes aos encontrados no presente estudo, onde, o 'mix' combinado com o manejo de 15 t ha⁻¹ de CLE, proporcionou a maior produtividade de grãos para a cultura (6297 kg ha⁻¹). Se compararmos com a média nacional estimada para a produtividade de grãos de soja nesta safra, que foi de aproximadamente 3251 kg ha⁻¹ (Conab, 2023), observa-se que a produtividade obtida neste estudo tanto para o tratamento com FM, quanto para as doses de CLE, foram superiores à média da região para esta cultura. Desta forma, com base nossos resultados, pôde-se observar que o fertilizante orgânico CLE associados ou não à diferentes plantas de cobertura, é uma fonte sustentável capaz de promover ganhos de produtividade de milho e soja em condições tropicais.

4.5 Correlação de Pearson

Na profundidade de 0–0,1 m, a EEG correlacionou-se positivamente com os indicadores P, MAP, PT, CT e com a PROD. Estes resultados indicam que os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) podem ter contribuído para a manutenção da saúde do solo nesta profundidade. Os FMA são essenciais para a agricultura, estando relacionados à síntese de proteínas como a EEG, atuando na adesão das partículas dos agregados do solo, beneficiando a formação de poros e constituindo-se em uma forma de armazenamento de C e outros nutrientes.

A síntese de EEG esta diretamente relacionada a manutenção e permanência do inóculo fungico no solo (Zhou et al., 2024). Portanto, o SPD (que inclui as práticas de rotação de culturas e o não revolvimento do solo) associado à fertilização orgânica, pode ter contribuído para estimular e proteger o inóculo de FMA, beneficiando a síntese de EEG pelo fungo e favorecendo processos como trocas gasosas, agregação e aporte de C e outros nutrientes no solo, como o P. Em solos tropicais, caracterizados pela baixa disponibilidade de nutrientes, especialmente o P, a associação micorrízica pode ter facilitado a aquisição deste nas duas profundidades pela soja, refletido em ganhos em produtividade.

Há poucos estudos sobre o impacto do CLE na comunidade microbiana do solo em condições tropicais. Entretanto, as correlações negativas observadas nas duas profundidades, podem indicar que os nutrientes foram temporariamente imobilizados por alguns microrganismos para a sua manutenção, possivelmente em função do ambiente e condições estressantes, especialmente altas temperaturas e ausência de chuva no ano IV (Figura 6). Embora a área de estudo estivesse sob um pivô central, o equipamento apresentou falha, resultando na ausência de irrigação no ano IV.

Silva et al. (2014), avaliando o efeito da aplicação consecutiva por três anos de composto de lodo de cortume no solo, sob condições tropicais, relatam que 5 t ha⁻¹ do composto, aplicada anualmente, não apresentou riscos potenciais à MBC do solo. Contudo, os autores enfatizam que é necessário monitorar as respostas à longo prazo. Estes resultados diferem do presente estudo, onde houve redução do MBC para o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE.

Os processos microbianos que envolvem o armazenamento, a transformação e a mineralização dos nutrientes no solo, podem utilizar o MBC como fonte energia. Portanto, as correlações negativas observadas nas duas profundidades, podem indicar que houve liberação de nutrientes que estavam retidos pela biomassa microbiana, possivelmente, em função de um ano IV com clima adverso (Figura 6).

5. CONCLUSÕES

Ao longo de seis anos de cultivos associado ao residual de três aplicações do CLE, foi possível verificar incrementos para os indicadores físicos, químicos

e biológicos de qualidade do solo nas profundidades 0–0,1 m e 0,1–0,2 m, especialmente quando o cultivo ‘mix’ foi combinado com o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE. Comparando-se ao tratamento controle, sem fertilização mineral ou orgânica, o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE associado ao cultivo ‘mix’ incrementou a macroporosidade em 116,7%, a porosidade total em 12,2% e reduziu a densidade e a resistência do solo a penetração em 15,7% e 39,2%, respectivamente em 0–0,1 m, e a resistência do solo a penetração em 25,4% em 0,1–0,2 m.

Os manejos também impactaram positivamente os indicadores químicos de qualidade do solo. Em relação ao tratamento controle, o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou em 448,6% o P, em 28,3% a CTC e em 28,3% o pH em 0–0,1 m. Na profundidade de 0,1–0,2 m, o incremento foi de 4,7% para o pH e 15,6% para a CTC. Quando combinado com o cultivo ‘mix’, o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE incrementou o teor de Zn na profundidade de 0–0,1 m, em 336,0%.

Os indicadores biológicos de qualidade do solo também responderam ao efeito residual do CLE em relação à ausência de fertilização. Houve incremento de 15,3% para o C total em 0–0,1 m e de 5,1% em 0,1–0,2 m, de 11,7% para o N total em 0,1–0,2 m, e de 5% para a glomalina facilmente extraível em 0–0,1 m. A atividade enzimática do solo foi incrementada em 26,6% para a β -glucosidase e em 11,7% para a arylsulfatase em 0–0,1 m. O residual de 30 t ha⁻¹ de CLE também incrementou a biomassa seca das plantas de cobertura, especialmente do ‘mix’.

Em comparação ao tratamento sem fertilização ou combinado com adubação mineral convencional, o ‘mix’ associado ao residual de 15 t ha⁻¹ de CLE incrementou o rendimento de grãos de soja em 14,7% e 17,6%, respectivamente, superando estimativa de produção para a região na safra atual.

Por meio de nossos resultados, é possível concluir que o cultivo de plantas de cobertura associado a adubação com o fertilizante orgânico CLE representam uma alternativa promissora para melhorar a saúde do solo e do ambiente, reduzir a dependência de fertilizantes minerais e melhorar a disposição final do lodo de esgoto sanitário, além de aumentar a produção agrícola de modo sustentável no Cerrado.

REFERÊNCIAS

Alves RS (2024). **Residual de composto de lodo de esgoto e inoculação com *Azospirillum brasilense* na fertilidade do solo, nutrição e desempenho agrônomo na sucessão trigo e soja**. 140 f. Dissertação (Mestrado em sistemas de produção) – Unesp, Ilha Solteira.

Anderson JPE, Domsch KH (1989) Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry** 21: 471–479.

Attia A, Marohn C, Shawon AR, Kock A, Strassmeyer J, Feike T (2024) Do rotations with cover crops increase yield and soil organic carbon? A modeling study in Southwest Germany. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 375: 109167.

Aleisa E, Alsulaili A, Almuzaini Y (2021) Recirculating treated sewage sludge for agricultural use: Life cycle assessment for a circular economy. **Waste Management**, 135: 79-89.

Blake GR, Hartge KH (1986) Bulk density. In A. Klute (Ed.), **Methods of soil analysis, Part 1- Physical and mineralogical methods** (2 ed., pp. 363–382). Agronomy Monograph 9. Madison, WI: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America.

Bradford MM (1976) A rapid and sensitive method for mycorrhizal association whit barley on sewage-amended plots. **Soil Biology & Biochemistry**, 20: 945–948.

Brasil (2020a) Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizantes em solos, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.161, p. 265, 21 ago. Seção 1.

Brasil (2020b) Instrução normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. **Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.134, p. 5, 15 jul. 2020b. Seção 1.

Cantarella, H., Quaggio, J. A., Mattos Júnior, D., Boaretto, R. M., & Raij, B. V. (2022). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo (pp. 236–238). 3ª ed. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (2006). Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Brasília, DF.

Cruz CV, Mateus CMD, Villas Boas RL, Gabira MM, Fernandes DM, Silva MR (2017). **Características físicas e químicas na compostagem do lodo de esgoto com três tipos de materiais estruturantes**. In: **Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**, 8. Curitiba, PR. Curitiba, Instituto Venturini. pp.1–7.

Çerçioğlu M, Udawatta, RP, Anderson SH (2025) Use of cover crops for sustainable management of soil conditions and health: A review. **Soil Security** 18:100177.

Farhangi-Abriz S, Ghassemi-Golezani K, Torabian S (2021) A short-term study of soil microbial activities and soybean productivity under tillage systems with low soil organic matter. **Applied Soil Ecology** 168: 104122.

Feng J, Burke IT, Chen X, Stewart DI (2023) Assessing metal contamination and speciation in sewage sludge: implications for soil application and environmental risk. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology** 22.

Ghimire R, Lamichane S, Acharya BS, Bista P, Sainju UM (2017) Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: A review. **Journal of Integrative Agriculture** 16: 1–15.

Kopittke PM, Menzies NW, Wang P, Mckenna BA, Lombi E (2019) Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environmental International** 132: 105078.

Li Y, Sun B, Deng T, Lian P, Chen J, Peng X (2021) Safety and efficiency of sewage sludge and Garden waste compost as a soil amendment based on the field application in woodland. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 222: 112497.

Lombardi Neto F, Drugowich M (1994) **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. Campinas: CATI, 2: 168.

Marin E, Rusanescu CO (2023) Agricultural use of urban sewage sludge from the wastewater station in the municipality of Alexandria in Romania. **Water** 15.

Mateo-Sagata J, Rachid-Sally LTA (2015) **Global wastewater and sludge production, treatment and use**. In: **Wastewater**. Springer, Dordrecht, 15–38.

Matos A (2018). **Potencialidades e limitações do uso de Lodo de Esgoto em solo-Aspectos Agronômicos, controle de atratividade de vetores e de impactos ambientais**. 2018. Belo Horizonte: Visual, 2018. Disponível em: <https://etes-sustentaveis.org/wp-content/uploads/2018/05/Palestra-Matos-Workshop-Lodo-2.pdf> >. Acesso em: 16 ago.

Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento secretária de defesa agropecuária – MAPA (2016) Limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo. **Instrução normativa Nº 7**.

Moustabchir A, Ouakil H, El ouazzani H (2024) Modeling the circular economy in food production: Insights from a dynamic stochastic general equilibrium analysis. **Scientific African** 25: e02479.

Nascimento, R.E.N (2024). **Balanco e eficiência no uso de nutrientes na rotação feijão-comum/soja/milho adubados com composto de lodo de esgoto no Cerrado**. 152 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Unesp, Ilha Solteira.

Nelson DW, Sommers LE (1963) Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. (Book Series, 5), 322-331.

Oliveira GS, Jalal A, Prates AR, Teixeira Filho MCM, Alves RS, Silva LC, Nascimento REN, Silva PST, Arf O, Galindo FS, Oliveira FC, Abreu-Júnior CH, Jani AD, Capra GF, Nogueira TAR (2023) Common Bean Productivity and Micronutrients in the Soil-Plant System under Residual Applications of Composted Sewage Sludge. **Plants** 12: 2153.

Pamba RM, Poirier V, Ndoutoumou PN, Epule TE (2023) (2023) How can plants help restore degraded tropical soils? **Land** 12: 2147.

Pandey S, Kumar P, Zlatic M, Nautiyal R, Panwar VP (2021) Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. **International Soil and Water Conservation Research** 9: 305–318.

Pereira P, Bugunovic I, Muñoz-Rojas M, Brevik EC (2018) Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. **Current Opinion in Environmental Science & Health** 5: 7–13.

Prates AR, Kawakami KC, Coscione AR, Teixeira Filho MCM, ARF O, Abreu-Júnior CH, Janic AD, Capra GF, Ganga A, Nogueira TAR (2022) Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on an Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land** 11: 1246.

R Core Team (2023) **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 26 jun.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Guaggio JA (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (1997) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, 1997. 285p.

Regitano JB, Rodrigues MM, Martins GL, Osti JF, Viana DG, De Sousa AJ (2021) **Sewage Sludge Management for Environmental Sustainability: An Introduction**. In: RAJPUT, V. D.; Nath, Y. A.; Jatav, H.S.; Singh, S.K.; Minkina, T. 2021. Sustainable Management and Utilization of Sewage Sludge.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJF, Oliveira JB (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa. 2018.

Silva AO, Silva WM, Kurihara CH, Mercante FM (2016) Spectrophotometric method for quantification of soil microbial biomass carbon. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 5, n.1, p. 565–570, 2016.

Silva MB, Camargos LS, Teixeira Filho, MCM, Souza LA, Coscione AR, Lavres J, Abreu-Júnior CH, He Z, Zhao F, Jani AD, Capra GF, Nogueira TAR (2023) Residual effects of composted sewage sludge on nitrogen cycling and plant metabolism in a no-till common bean-palisade grass-soybean rotation. **Frontiers in Plant Science** 14: 1281670.

Shan Y, LV M, Zuo W, Tang Z, Ding C, Yu Z, Shen Z, Gu C, Bai Y (2021) Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. **Scientific Reports**, 1402, 2021.

Spliethoff J, Rampim L, Pott CA (2019) Performance of cover and corn plants in different mechanical and biological management associations. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 14: e6655.

Soil Survey Staff (2022) **Keys to Soil Taxonomy**, 13th ed.; USDA—Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA.

Tabatabai MA (1994) Soil Enzymes. In “Methods of Soil Analysis – Part 2 Microbiological and Biochemical Properties” (R. W. Weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. Bezdicsek, S. Smith, M. A. Tabatabai, A. Wollum, eds.), pp. 786-944. SSSA, Madison, WI. 1994.

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (2017) **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: EMBRAPA, 2017. 574 p.

Topa D, Cara IG, Jitareanu G (2021) Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis. **CATENA**, 199: 105102.

Tormena CA, Silva AP, Libardi PL (1998) Caracterização do interval hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22: 573–581.

United Nations Organization – Onu (2019) How certain are the United Nations global population projections? Population facts. https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/popfacts/PopFacts_2019-6.pdf. Acesso em: 15 de nov., 2024.

Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford 19: 703–707.

Wright SF, Franke-Snyder M, Morton JB, Upadhyaya A (1996) Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. **Plant and Soil** 181: 193–203, 1996.

Wulanningtyas HS, Gong Y, Li P, Sakagami N, Nishiwaki J, Komatsuzaki M (2021) A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil and Tillage Research** 205: 104749.

Young MD, Ros GH, Vries W (2021) Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 319: 107551.

Zheng G, Yu B, Wang Y, Ma C, Chen T (2021) Fate and biodegradation characteristics of triclocarban in wastewater treatment plants and sewage sludge composting processes and risk assessment after entering the ecological environment. **Journal of Hazardous Material** 412: 125270.

CAPÍTULO 3 – IMPACTO DO USO DE FERTILIZANTE ORGÂNICO ASSOCIADO A PLANTAS DE COBERTURA NA SAÚDE DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE SOJA EM CONDIÇÕES TROPICAIS

RESUMO – O uso de fertilizante orgânico a partir de composto de lodo de esgoto (CLE), combinado com o manejo de plantas de cobertura, pode ter um impacto positivo na saúde do solo e na produtividade da soja em condições tropicais. Objetivamos avaliar o efeito do cultivo de culturas de cobertura associadas ao fornecimento de fertilizantes minerais ou orgânico (CLE), monitorando a saúde do solo (SS) por meio da análise de indicadores químicos (pH, P e K), físicos (densidade do solo-DS) e biológicos (atividade enzimática da β -glucosidase, C Biomassa microbiana-MBC e C total-CT) em duas profundidades (0,0–0,1 m e 0,1–0,2 m). Estes indicadores foram convertidos em índices de SS por meio da ferramenta *SMAF* e correlacionados com a produtividade da soja cultivada em condições tropicais. Um experimento de campo de seis anos foi realizado na região do Cerrado usando um delineamento em blocos casualizados com oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial: dois sistemas de cultivo/rotação (I. soja/milho/capim-marandu/feijão/aveia/trigo e II. arroz/feijão/capim-marandu/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto) e quatro tipos de adubação (*i* = sem adubação com CLE e fertilizantes minerais, *ii* = sem adubação com CLE e adubação mineral convencional, *iii* = fornecimento de 15 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) e *iv* = fornecimento de 30 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) em área total. Os indicadores foram favorecidos pelo residual de 30 t ha⁻¹ de CLE. Comparando-se ao tratamento controle (sem adubação mineral ou orgânica) houve incrementos médios de 6% para o pH, 51% para o K, 400% para P, 19% para β -glucosidase e 10% para CT. Os resultados demonstram que o residual de três aplicações de CLE (30 t ha⁻¹), combinado com o manejo do 'mix' de plantas de cobertura (crotalária juncea, nabo forrageiro e milheto) contribui para melhorar a SS nas duas profundidades, além de aumentar a produtividade da soja.

Palavras-chave: Economia Circular, *Glycine max* L., Segurança alimentar, Agricultura regenerativa, Lodo de esgoto.

CHAPTER 3 – IMPACT OF ORGANIC FERTILIZER AND COVER CROPS ON SOIL HEALTH AND SOYBEAN PRODUCTIVITY IN TROPICAL CONDITIONS

ABSTRACT – The use of organic fertilizer from composted sewage sludge (CSS), combined with cover crops management, can have a positive impact on soil health and soybean productivity in tropical conditions. Our objective is to evaluate the effect of growing cover crops associated with the supply of mineral or organic fertilizers (*i.e.*, CSS), monitoring soil health (SS) through the analysis of chemical (pH, P, and K), physical (Soil bulk density- SD), and biological (enzymatic activity of β -glucosidase, C Microbial Biomass – MBC, and C Total - CT) indicators at two depths (0–0.1 m and 0.1–0.2 m). These indicators were converted into SS indexes using the *SMAF* tool and correlated with the productivity of soybeans grown in tropical conditions. A six-year field experiment was carried out in the Cerrado region using a randomized complete block design with eight treatments and four replications. The treatments were arranged in a factorial scheme: two cropping/rotation systems (I. soybean/maize/capim-marandu/beans/oats/wheat) and II. rice/bean/capim-marandu/maize/soybean + mix of fodder turnip, crotalaria and millet) and four types of fertilization (*i* = no fertilization with CSS and mineral fertilizers, *ii* = no fertilization with CSS and conventional mineral fertilization, *iii* = supply of 15 Mg ha⁻¹ of CSS (wet basis) and *iv* = supply of 30 Mg ha⁻¹ of CSS (wet basis) in total area. The indicators were improved by the residual of 30 Mg ha⁻¹ of CSS. Compared to the control treatment (without mineral or organic fertilization) there were medium increases of 6% for pH, 51% for K, 400% for P, 19% for β -glucosidase, and 10% for TC. By analyzing the SS indices, it can be concluded that the residual of three applications of CSS (30 Mg ha⁻¹), combined with the management of a mix of cover crops (crotalaria juncea, turnip rape and millet) is effective in improving SS at both depths and soybean grain yield.

Keywords: Circular economy, *Glycine max* L., Food security, Regenerative agriculture, Sewage sludge.

1. INTRODUÇÃO

Os solos são amplamente reconhecidos por serem sistemas vivos. O seu fornecimento de serviços ecossistêmicos é uma das bases para a conservação ambiental e produção sustentável de alimentos. Contudo, a degradação destes segue impactando negativamente. De acordo com os relatórios gerados pela FAO, aproximadamente 33% destes já estão degradados e mais de 90% poderão ficar até 2050 (FAO; ITPS, 2015; IPBES, 2018). Impulsionada por variações climáticas e atividades antropogênicas, a degradação de solos tropicais tornou-se um problema global que ameaça severamente o ambiente ecológico e a segurança alimentar (Wang et al., 2023).

Em regiões tropicais, a monocultura extensiva é um dos fatores que mais contribuem para intensificar a degradação dos solos. Sua adoção contribui para o aumento da compactação, esgotamento de nutrientes e acidificação dos solos (Crespo et al., 2021). Ainda, quando associada ao uso indiscriminado de fertilizantes minerais, os danos podem ser intensificados por meio da lixiviação e emissão de gases de efeito estufa (Menegat; Ledo; Tirado, 2022). Ainda que o agronegócio seja de extrema importância para a economia brasileira, é preciso que este setor esteja alinhado a conservação e preservação ambiental. Desta forma, manejos conservacionistas associados as premissas da economia circular, que inclui o uso de fertilizantes orgânicos gerados a partir de resíduos urbanos, pode ser uma alternativa para a manutenção da saúde de solos (SS) e produção de alimentos em condições tropicais.

As premissas da agricultura conservacionista englobam diferentes práticas, como o mínimo revolvimento do solo, manutenção da cobertura vegetal e a diversificação de plantas (Bolan et al 2023). Desta forma, sistemas como a integração lavoura pecuária (ILP), pecuária floresta (ILPF) e o sistema plantio direto (SPD) contribuem para a sustentabilidade e rentabilidade do sistema agro/ambiental (Sarto et al., 2020; Besen et al., 2024; Silva et al., 2024). No SPD a diversificação de espécies, solteiras ou combinadas em um “mix”, são recomendadas para solos da região de Cerrado, em função de suas raízes profundas, tolerância ao estresse hídrico e alta produção de biomassa (Spliethoff; Rampim; Pott, 2019). Outros benefícios associados ao uso de plantas de cobertura são o fornecimento de nutrientes as culturas sucessoras a médio e longo prazo (Topa; Cara;

Jitareanu, 2021), diminuição das variações de temperatura e umidade (Shulman, et al., 2025), aumento do teor e proteção física da matéria orgânica (Wulanningtyas et al., 2021), além da manutenção das populações de microrganismos (Farhangi-Abriz; Ghassemi-Golezani; Torabian, 2021), melhorando os aspectos químicos, físicos, biológicos (Young; Ros; Vries, 2021). O SPD, quando associado a alguma fonte de nutrientes, pode potencializar os benefícios para SS. Portanto, diante do cenário atual, onde o país ainda é fortemente dependente do mercado externo de fertilizantes minerais, alternativas sustentáveis advindas da economia circular, como o reaproveitamento de resíduos, podem ser uma solução viável nesse processo.

A destinação correta de resíduos, como o lodo de esgoto (LE), pode transformá-los em fontes alternativas de nutrientes para a agricultura. Contudo, seu uso é desafiador, devido aos custos relacionados ao seu descarte e às leis ambientais rigorosas. Como alternativa, processos como a compostagem são sugeridos para reduzir patógenos e metais pesados (Li et al., 2021; Zheng et al., 2021). Após esse tratamento, o LE pode ser utilizado como fertilizante orgânico, especialmente em solos degradados ou que perderam parte de sua capacidade produtiva. Porém, é necessário monitorar os impactos na qualidade do solo por meio de indicadores físicos, químicos e biológicos, utilizando ferramentas como o '*Soil management assessment framework* – *SMAF*' (Andréws; Karlen; Cambardella, 2004; Becker et al., 2025).

O *SMAF* utiliza curvas de pontuação não lineares para integrar propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, fornecendo informações específicas no que diz respeito à gestão da terra e aos serviços ecossistêmicos (Karlen et al., 2019). Esta ferramenta tem sido amplamente utilizada para avaliar os efeitos de diferentes manejos sobre a SS, como a rotação de culturas e manejo de resíduos em Inceptisols sul-africanos (Gura; Mnkeni, 2019), irrigação em Aridisols nos Estados Unidos (Ippolito et al., 2017), mudança no uso da terra em Oxisols e Ultisols brasileiros (Lisboa et al., 2019). Entretanto, ainda existem poucas informações sobre o uso do fertilizante orgânico CLE associado à rotação de culturas em solos da região do Cerrado. Os resultados da presente pesquisa, poderão contribuir para o uso eficiente de fontes alternativas de nutrientes na agricultura, reduzindo o aporte de fertilizantes convencionais, promovendo maior rentabilidade econômica e destino sustentável para os

resíduos urbanos. Para tal, testamos as seguintes hipóteses: *i)* mudanças na SS, na região do Cerrado sob diferentes manejos, podem ser detectadas pela *SMAF* e *ii)* o residual de três aplicações de CLE associado ao cultivo de crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e milheto (*Pennisetum glaucum* L.) na forma de “mix” de plantas de cobertura utilizadas em comparação ao cultivo “solteiro” do capim-marandu (*Urochloa brizantha*), é mais efetivo na melhoria da SS, refletindo em ganhos de produtividade de grãos de soja. Assim, em um experimento de seis anos, avaliou-se o efeito do cultivo de plantas de cobertura associadas ao fornecimento de fertilizantes minerais ou orgânico (CLE) na saúde do solo (SS) com o auxílio da ferramenta de avaliação dinâmica *SMAF*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido em condições de campo, no município de Selvíria/MS, Brasil, apresentando as coordenadas geográficas de 20°20'35" S e 51°24'04" W, com altitude de 358 m (Figura 13).

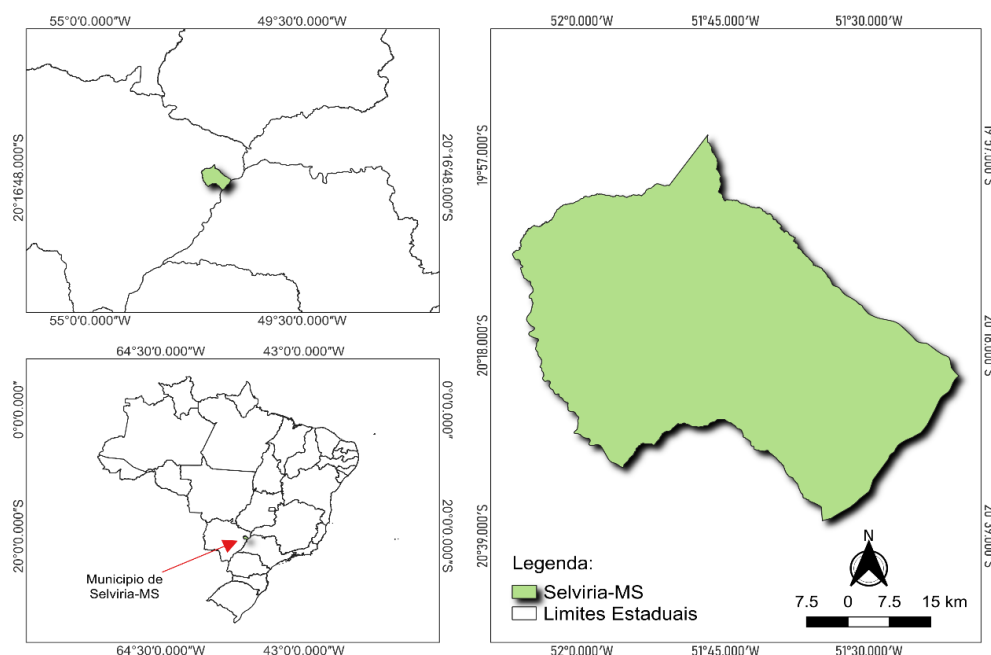


Figura 13. Área experimental localizada no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil.

A região apresenta médias anuais de precipitação pluvial de 1.370 mm, temperatura de 24,5 °C e umidade relativa do ar de 75%. O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (Lombardi Neto; Drugowich, 1994). O experimento foi conduzido em condições de campo, no município de Selvíria/MS, Brasil, apresentando as coordenadas geográficas de 20°20'35" S e 51°24'04" W, com altitude de 358 m. A região apresenta médias anuais de: precipitação pluvial de 1.370 mm, temperatura de 24,5 °C e umidade relativa do ar de 75%. O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (Lombardi Neto; Drugowich, 1994). Durante toda a realização do experimento estão sendo coletados os dados diários referentes às temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e precipitação pluvial (Figura 14).

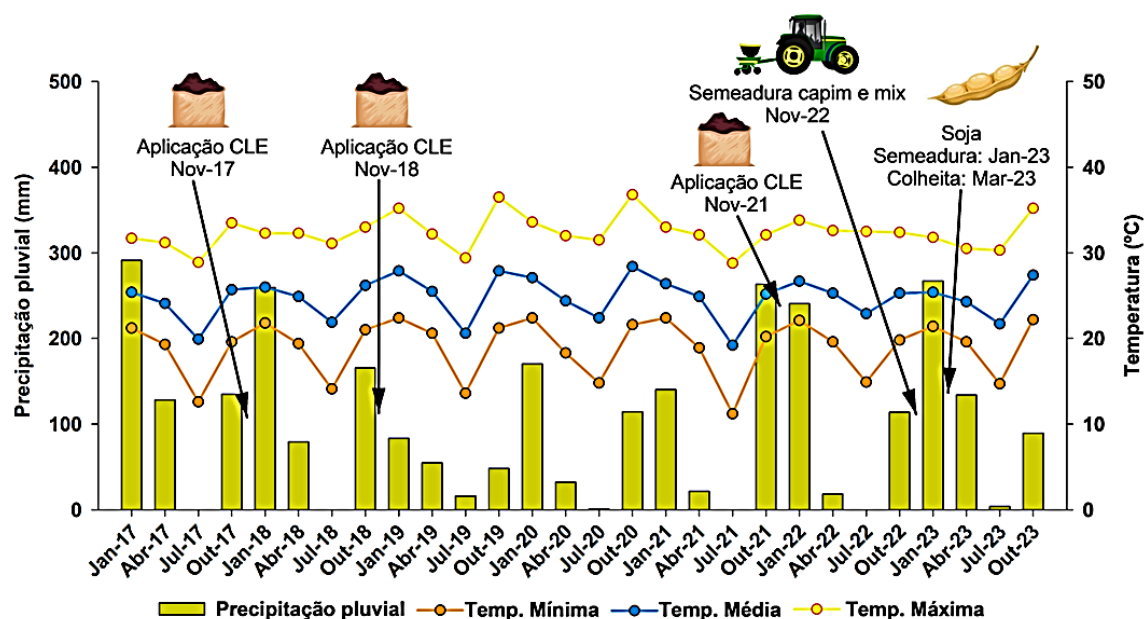


Figura 14. Área experimental localizada no município de Selvíria, Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil.

2.2. Delineamento experimental e tratamentos

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com oito tratamentos e quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos

foram arranjados em esquema fatorial sendo: dois cultivos (I. soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja) e (II. arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja) e quatro tipos de adubação (*i* = sem adubação com CLE e fertilizantes minerais, *ii* = sem adubação do CLE e com adubação mineral convencional, *iii* = fornecimento de 5 t ha⁻¹ de CLE (base úmida) e *iv* = fornecimento de 10 t ha⁻¹ de CLE (base úmida). No ano agrícola 2021/22, as doses acumuladas de CLE corresponderão a 15 e 30 t ha⁻¹ (base úmida) em razão das três aplicações realizadas anos agrícolas 2017/18, 2018/19 e 2021/22. No ano agrícola 2022/23, visando verificar o efeito residual das três aplicações do CLE não foi realizado adubação orgânica, mantendo-se somente o que já foi realizado na área experimental (Figura 15).

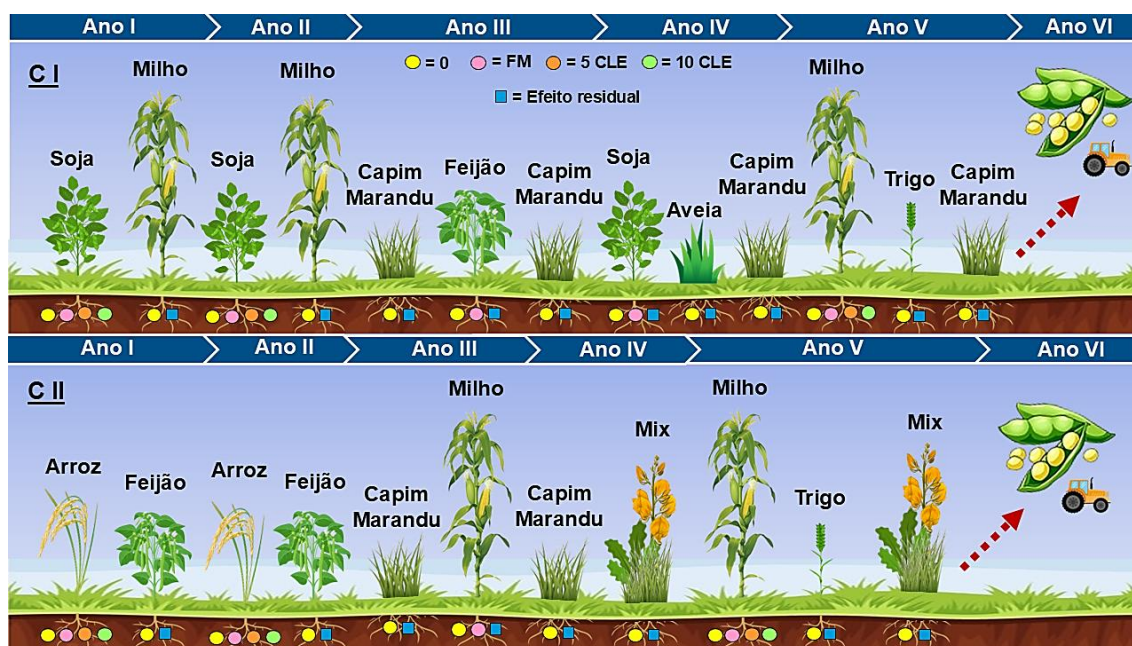


Figura 15. Tratamentos aplicados e cultivos realizados ao longo de seis anos de experimentação. FM: Fertilizantes minerais fontes de N, P, K, B e Zn. FO: fertilizante orgânico a base de composto de lodo de esgoto, aplicado nas doses de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida). As doses de CLE foram estabelecidas conforme recomendações técnicas do fornecedor do fertilizante orgânico (empresa Tera Ambiental). Planta de cobertura "mix": nabo forrageiro, crotalária e milheto.

2.3. Obtenção e caracterização do fertilizante orgânico

O CLE foi obtido na empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP. Trata-se de um fertilizante orgânico Classe B (Brasil, 2020), produzido a partir da compostagem termofílica de resíduos orgânicos urbanos diversos. A

principal matéria prima que compõe o produto é o lodo de esgoto sanitário, cerca de 70% em massa, advindo do tratamento de esgotos sanitários em Jundiaí e Municípios vizinhos. Além do lodo de esgoto, também entra no processo de compostagem, lodos de Sistemas de Tratamento de Águas Residuárias geradas em Agroindústrias, tais como cervejarias e indústrias de alimentos diversos, restos de frutas, legumes e verduras, pré e pós consumo, segregados na fonte e coletados de forma diferenciada, restos de produtos alimentícios industrializados e inservíveis entre outros. O CLE foi caracterizado ponto de vista químico e microbiológico, seguindo as recomendações preconizadas na Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama (Conama 2006) (Tabela 7).

2.4. Histórico e desenvolvimento do experimento

O preparo inicial da área experimental foi realizado em setembro de 2017, época em que foi realizada uma escarificação a 0,3 m de profundidade. Com base nos resultados da avaliação da fertilidade do solo, foi realizada a calagem ($2,2 \text{ t ha}^{-1}$) com calcário agrícola (80% de PRNT), objetivando elevar a saturação por bases a 70% e, em seguida, aplicação de $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso agrícola (Cantarella et al., 2022), em superfície e sem incorporação. Antes da instalação do experimento foram realizadas amostragens do solo na camada de 0–0,2 m de profundidade para caracterizações física (Teixeira et al., 2017) e química (Raij et al., 2001) (Tabela 8).

Cada unidade experimental é constituída por 3,5 m de largura e de 10 metros de comprimento, totalizando 35 m^2 por parcela. A área útil da parcela para as avaliações foi constituída pelas três linhas centrais, sendo eliminados como bordadura 2,5 m de cada extremidade. A semeadura do capim-marandu ocorreu em agosto/22, sendo utilizado o espaçamento de 0,34 m entre as linhas de cultivo. As plantas foram cultivadas até 60 dias após a emergência (DAE). Na área com o cultivo II (C II), o mix foi semeado em agosto (02/08/22), com espaçamento de 0,34 m (plantas intercaladas com espaçamento de 0,17 m) e cultivado até 60 DAE.

Tabela 7. Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).

Característica	Unidade	2017/18	2018/19	2021/22	Valor permitido ⁽¹⁾
Química		Base seca			
pH _(CaCl2)	-	7,0 $\pm$ 0,1	7,3 $\pm$ 0,0	8,0 $\pm$ 0,4	-- ⁽²⁾
Umidade (60–65 °C)	%	41,0 $\pm$ 0,3	34,4 $\pm$ 0,5	36,7 $\pm$ 0,1	--
Umidade Total	%	45,5 $\pm$ 0,2	35,8 $\pm$ 0,6	38,2 $\pm$ 0,1	--
MO Total	g kg ⁻¹	308,7 $\pm$ 9,9	255,0 $\pm$ 7,3	200,0 $\pm$ 26,8	--
C Orgânico	g kg ⁻¹	153,1 $\pm$ 4,80	126,6 $\pm$ 3,57	11,10 $\pm$ 14,87	--
CTC	mmol _c dm ⁻³	520,0 $\pm$ 20,0	--	263,3 $\pm$ 81,4	--
C/N	-	12,0 $\pm$ 0,8	9,0 $\pm$ 0,5	11,0 $\pm$ 3,5	--
N Total	g kg ⁻¹	13,9 $\pm$ 0,2	15,3 $\pm$ 1,5	10,7 $\pm$ 3,0	--
P Total	g kg ⁻¹	12,3 $\pm$ 1,3	14,1 $\pm$ 0,0	16,5 $\pm$ 4,5	--
S Total	g kg ⁻¹	4,8 $\pm$ 0,2	8,4 $\pm$ 1,5	7,3 $\pm$ 0,9	--
Na	mg kg ⁻¹	3930,0 $\pm$ 32,0	3915 $\pm$ 41,2	--	--
K	g kg ⁻¹	6,00 $\pm$ 2,2	8,2 $\pm$ 0,4	4,7 $\pm$ 2,8	--
Ca	g kg ⁻¹	19,4 $\pm$ 4,4	31,1 $\pm$ 1,1	41,7 $\pm$ 17,4	--
Mg	g kg ⁻¹	5,2 $\pm$ 0,5	9,9 $\pm$ 0,2	11,3 $\pm$ 2,2	--
As	mg kg ⁻¹	3,2 $\pm$ 1,7	--	3,3 $\pm$ 1,1	20,0
B	mg kg ⁻¹	94,0 $\pm$ 4,5	94,0 $\pm$ 4,6	--	--
Cd	mg kg ⁻¹	1,0 $\pm$ 0,0	--	1,0 $\pm$ 0,4	3,0
Cu	mg kg ⁻¹	237,0 $\pm$ 16,5	191,2 $\pm$ 5,8	246,3 $\pm$ 69,0	--
Pb	mg kg ⁻¹	18,0 $\pm$ 1,6	--	17,6 $\pm$ 0,7	150,0
Cr	mg kg ⁻¹	54,2 $\pm$ 1,7	--	64,4 $\pm$ 1,0	--
Fe	mg kg ⁻¹	16400 $\pm$ 130	14708 $\pm$ 249	12405 $\pm$ 522	--
Mn	mg kg ⁻¹	246,0 $\pm$ 37,0	310,0 $\pm$ 15,0	591 $\pm$ 89,0	--
Hg	mg kg ⁻¹	0,2 $\pm$ 0,0	--	0,1 $\pm$ 0,1	1,0
Mo	mg kg ⁻¹	5,7 $\pm$ 0,2	--	6,6 $\pm$ 2,4	--
Ni	mg kg ⁻¹	26,5 $\pm$ 0,5	--	23,3 $\pm$ 4,6	70,0
Zn	mg kg ⁻¹	456,0 $\pm$ 8,0	684 $\pm$ 7,2	1083 $\pm$ 339,5	--
Microbiológica					
<i>Salmonella</i> sp	NMP/10g	Ausente	Ausência em 10 g de MS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/g	0	1.000,0		
Ovos Viáveis de Helmintos	Ovos/g	0,12	1,0		

NMP = Número mais provável. ⁽¹⁾ Instrução normativa N° 7 MAPA (2016). ⁽²⁾ Não determinado.

Tabela 8. Atributos químicos (1) e físicos (2) das amostras de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico utilizados no experimento (Média $\pm$ desvio-padrão; $n = 3$).

Atributos	Unidade	Profundidade (m)
		0–0,2
pH _(CaCl2)	--	4,5 $\pm$ 0,1
Matéria orgânica	g kg ⁻¹	19 $\pm$ 1,2
Fósforo	mg kg ⁻¹	16 $\pm$ 0,6
Potássio	mmol _c kg ⁻¹	1,7 $\pm$ 0,2
Cálcio	mmol _c kg ⁻¹	13 $\pm$ 0,6
Magnésio	mmol _c kg ⁻¹	12 $\pm$ 1,0
Alumínio	mmol _c kg ⁻¹	4 $\pm$ 0,0
H+Al	mmol _c kg ⁻¹	37 $\pm$ 2,3
SB	mmol _c kg ⁻¹	27,0 $\pm$ 1,7
S-SO ₄	mg dm ⁻³	15 $\pm$ 0,6
CTC	mmol _c kg ⁻¹	63,7 $\pm$ 0,8
V	%	42 $\pm$ 3,2
Boro	mg kg ⁻¹	0,22 $\pm$ 0,1
Cobre	mg kg ⁻¹	1,8 $\pm$ 0,1
Ferro	mg kg ⁻¹	15 $\pm$ 0,6
Manganês	mg kg ⁻¹	18,8 $\pm$ 0,6
Zinco	mg kg ⁻¹	0,6 $\pm$ 0,1
Areia (> 0.05 mm)	g kg ⁻¹	553 $\pm$ 12,9
Silte (> 0.002 e < 0.05 mm)	g kg ⁻¹	81 $\pm$ 3,2
Argila (< 0.002 mm)	g kg ⁻¹	372 $\pm$ 19,0
Textura	-	Argilosa

MO = matéria orgânica. CTC = Capacidade de troca catiônica. SB = Soma de bases. V = Saturação por bases. ⁽¹⁾ Raij et al. (2001). ⁽²⁾ Teixeira et al. (2017).

Para o capim-marandu e o “mix” de plantas de cobertura, aos 60 DAE, após a coleta da biomassa, foram aplicados os herbicidas 2,4-D e glifosato, sendo aplicado 1.800 g ha⁻¹ e 670 g ha⁻¹ do ingrediente ativo (i.a.), respectivamente. Após 30 dias, uma nova aplicação com glifosato e aurora, 670 g ha⁻¹ e 77 mL ha⁻¹ do ingrediente ativo (i.a.), foi realizada em ambas as áreas para o controle das plantas espontâneas.

No ano agrícola 2022/23, visando avaliar o efeito residual das aplicações do CLE, não foi realizada aplicação do fertilizante orgânico. A semeadura da soja ocorreu novembro/2022, utilizando uma semeadora-adubadora de precisão de sete linhas com espaçamento de 0,50 m, com população de 320 mil plantas por ha⁻¹, conforme a recomendação para a cultura. As adubações de semeadura e cobertura para a cultura foram realizadas somente nas parcelas do tratamento com MF, conforme as recomendações de Cantarella et al. (2022).

Na adubação de semeadura foram fornecidos 30 kg ha⁻¹ de N (via ureia) e 40 kg ha⁻¹ de K₂O (via cloreto de potássio). Na adubação de cobertura, realizada após 30 dias, aplicou-se (única aplicação) 40 kg ha⁻¹ de K₂O (via KCl). A aplicação de cobertura foi realizada distribuindo-se o fertilizante sobre a superfície do solo, sem incorporação, ao lado das linhas de semeadura. O manejo fitossanitário foi realizado seguindo as recomendações técnicas para o desenvolvimento da soja na região.

2.5 Variáveis avaliadas no experimento

2.5.1. Indicadores de qualidade do solo

Anteriormente ao cultivo da soja (2022/23), foram realizadas coletas do solo nas profundidades de 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2). Nestas amostras foram avaliados os indicadores de saúde do solo físicos, químicos e biológicos. A coleta dessas amostras foi realizada dentro da área útil de cada parcela.

A densidade do solo (DS) foi determinada pelo método do anel volumétrico (Blake; Hartge, 1986). Os atributos químicos do solo pH, teores de fósforo (P) e potássio (K) foram avaliados seguindo a metodologia proposta por Raij et al (2001). Os valores de pH foram determinados potenciometricamente em suspensões de terra fina seca ao ar (TFSA) em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ na proporção solo-solução de 1:2,5. O K trocável e o P foram extraídos também por resina, sendo determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria. Para os IB, a atividade enzimática da β-glucosidase foi mensurada pelos métodos descritos por Tabatabai (1994). O teor total de C foi determinado utilizando-se o método de combustão a seco (Nelson; Sommers, 1996), por meio de um analisador elementar de C (LECO CN-2000, St. Joseph, Mi, USA). O C–biomassa microbiana (MBC) foi realizado pelo método de fumigação-extração (Vance; Brookes; Jenkinson, 1987), com leitura em espectrofotômetro. O C foi determinado por leitura de absorbância em espectrofotômetro, em comprimento de onda de 495 nm, sendo feita a comparação entre as amostras fumigadas e não fumigadas.

2.5.2. Avaliação da saúde do solo

A saúde do solo (SS) foi avaliada pela metodologia “*Soil Management Assessment Framework – SMAF*”, sendo realizada por meio de três etapas: i) seleção de um conjunto mínimo de dados (indicadores químicos, físicos e biológicos do solo); ii) interpretação de indicadores medidos; e, iii) integração dos indicadores em um índice geral. O conjunto de dados incluiu os indicadores que apresentarem sensibilidade aos manejos empregados.

As curvas de pontuação *SMAF* levam em conta vários “fatores de classe” específicos do local, incluindo tipo de solo, conteúdo de matéria orgânica inerente, textura, clima, declive, região, mineralogia, classe de intemperismo, cultura, tempo de amostragem e o método analítico usado para avaliações de P. Para este estudo, a classe de matéria orgânica (usada para pontuação de CT) foi 4 (baixa MO). A distribuição do tamanho das partículas é importante para pontuação de DS e CT e então a textura foi classificada como 4 para os solos argilosos. O fator climático (usado para pontuação de CT) foi 1 (≥ 170 dias sem geada e ≥ 550 mm de precipitação média anual) e a classe de mineralogia (usada para pontuação de DS) foi 1 (argila 2:1 e óxidos de Fe e Al). Intemperismo, classe de declive e método de P foram 2 (alto intemperismo), 2 (2–5% de declive) e 5 (resina), respectivamente. A cultura foi a soja (código 82), enquanto os limites de P e pH da água foram definidos usando diretrizes oficiais de fertilidade do solo para a cultura (Raij et al., 1997).

Os valores ótimos de P e pH (pontuação = 1) foram 40 mg dm^{-3} e 6, respectivamente. Os algoritmos *SMAF* são baseados no pH em água, portanto, as medições do pH em CaCl_2 foram convertidas para $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (Cherubin et al., 2016). A curva de pontuação para o K foi ajustada para ser consistente com as classes de interpretação do nutriente para a região de estudo (Cantarella et al., 2022; Raij et al., 1997; Wienhold et al., 2009). Os valores de K, inicialmente expressos em mmolc kg^{-1} , foram convertidos para mg kg^{-1} multiplicando-se os valores pela massa molar do elemento (39,1). Por fim, cada indicador foi pontuado transformando-se os valores laboratoriais medidos em pontuações de 0 a 1 usando curvas de pontuação não lineares na planilha *SMAF* (Andrews et al., 2004; Wienhold et al., 2009). Todas as pontuações dos

indicadores foram integradas a um índice de saúde do solo (*SHI*) usando uma abordagem aditiva ponderada conforme descrito na Equação (1):

$$SHI = \sum_{i=1}^n S_i W_i \dots \dots \dots \text{equação (1)}$$

onde, S_i é a pontuação do indicador e W_i o valor ponderado dos indicadores. Os indicadores foram ponderados com base nos IF, IQ e IB. Portanto, independentemente do número de indicadores, cada grupo teve peso igual (33,33%) no índice final (Cherubin et al., 2021). A contribuição relativa de cada atributo para o *SHI* geral foi calculada para identificar quais indicadores foram mais afetados pelo sistema de cultivo e adubação, visando práticas aprimoradas de rotação de culturas que aumentam a produtividade das culturas e melhoram a saúde do solo.

2.5.3. Produção de biomassa das plantas de cobertura e de produtividade de grãos

Aos 60 dias após emergência (DAE) das plantas de cobertura, foi realizado a coleta da parte aérea em seis pontos dentro da área útil das parcelas, aleatoriamente, o mais rente possível do solo e com o auxílio de um quadrado de ferro de 0,25 m². As amostras foram lavadas em água corrente, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa com circulação forçada de ar, mantida a 65 °C por 72 h, para obtenção da produção de massa seca por hectare. Para estimar a produtividade de grãos de soja, todas as plantas da área útil da parcela foram colhidas manualmente, trilhadas mecanicamente, pesadas, e posteriormente, realizados os cálculos com extrapolação para kg ha⁻¹ e corrigidos para o teor de 13% de umidade.

2.6. Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste Tukey ($P \leq 0,05$), nos casos em que o teste F for significativo. Também foram realizados estudos de correlação (correlação de

Pearson) e análise de componentes principais (PCA) entre os índices de saúde do solo e a produtividade da soja. A análise estatística foi realizada por meio do software R (R CORE TEAM, 2024). Os indicadores de saúde do solo foram avaliados pela metodologia SMAF, sendo gerado um índice geral de saúde do solo (SHI).

3. RESULTADOS

3.1. Efeito dos manejos dos manejos nos indicadores de saúde do solo

Foram quantificados seis indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, sendo o físico: densidade do solo; os químicos: pH, P e K e os biológicos: atividade enzimática da β -glucosidase, C da biomassa microbiana (MBC) e C total (CT). Entre esses indicadores, os químicos e biológicos apresentaram maior sensibilidade na detecção de mudanças na saúde do solo (SS) após seis anos de manejo com culturas e três aplicações de CLE.

O residual de 30 t ha⁻¹ de CLE elevou o pH nas duas profundidades e o P e K na P1 (Tabela 9). Os incrementos em relação ao tratamento controle (sem fertilização mineral ou orgânica) foram de 7,4% e 4,0% para o pH nas profundidades de 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2), respectivamente e, de 50,8% para o K e de 448,0% para o teor de P na P1 (Tabela 9).

Na P2 a adubação MF incrementou o teor de P em 439,0% em relação ao tratamento controle, sendo este superior aos demais manejos de adubação nesta profundidade (Tabela 9). Em relação aos cultivos, o 'mix' foi superior ao cultivo solteiro do capim-maradu para o teor de P nas duas profundidades (Tabela 9). Os incrementos foram de 53,1% na P1 e de 73,7% na P2 (Tabela 9).

Em relação ao tratamento controle, o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE elevou o CT nas duas profundidades (Tabela 9). Os incrementos foram de 15,3% na P1 e de 5,0% na P2 (Tabela 9).

O incremento na atividade enzimática da β -glucosidase para o cultivo 'mix' em relação ao cultivo solteiro do capim-maradu na P1 foi de 19,0% (Tabela 9).

Tabela 9. Efeito dos tratamentos nos indicadores de saúde do solo – físico: densidade do solo (DS), químicos: pH, P, K e biológicos: β -glucosidase (β G), C total (CT) e C da biomassa microbiana (MBC), nas profundidades de 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2).

Tratamentos	DS		pH _{H2O}		P		K		βG		CT		MBC	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
	—kg dm ⁻³ —				—mg dm ⁻³ —		—mg kg —		mg p-nitrofenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹		——%——		µg MBC g ⁻¹ solo	
Adubação														
Controle	1,54 a	1,60 a	5,93 bc	6,00 ab	6,50 c	4,87 c	39,10 b	46,13 a	58,42 a	50,74 a	1,83 b	1,77 ab	75,45 a	79,00 a
FM	1,45 ab	1,52 a	5,73 c	5,56 b	32,72 a	26,25 a	64,51 a	53,17 a	72,18 a	48,96 a	1,87 ab	1,62 b	29,58 b	48,32 b
15 t ha ⁻¹ de CLE	1,44 b	1,55 a	6,15 ab	5,98 ab	20,97 b	13,75 b	53,56 ab	44,18 a	66,67 a	48,26 a	1,82 b	1,69 b	67,09 a	52,24 b
30 t ha ⁻¹ de CLE	1,39 b	1,45 a	6,37 a	6,24 a	35,66 a	21,50 ab	59,04 a	52,00 a	73,53 a	57,90 a	2,11 a	1,86 a	21,74 b	51,32 b
Cultivo														
C I	1,48 a	1,54 a	5,97 a	5,82 a	18,49 b	12,12 b	50,83 a	44,57 a	61,82 b	49,25 a	1,89 a	1,76 a	72,85 a	83,65 a
C II	1,44 a	1,52 a	6,11 a	6,06 a	29,43 a	21,06 a	57,08 a	53,17 a	73,57 a	53,68 a	1,93 a	1,70 a	24,08 b	31,79 b
Teste F														
Adubação (A)	6,20**	2,13 ^{NS}	12,64**	5,65**	61,02**	18,17**	8,46**	0,41 ^{NS}	1,82 ^{NS}	1,92 ^{NS}	4,52*	5,84**	30,74**	10,66**
Cultivo (C)	2,57 ^{NS}	0,30 ^{NS}	3,00 ^{NS}	4,09 ^{NS}	41,56**	16,57**	2,64 ^{NS}	1,71 ^{NS}	5,32*	1,93 ^{NS}	0,37 ^{NS}	2,17 ^{NS}	102,15**	140,52**
(A) x (C)	4,06*	0,92 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,44 ^{NS}	2,23 ^{NS}	1,19 ^{NS}	0,52 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,25 ^{NS}	20,47**	20,24**
Média Geral	1,46	1,53	5,59	5,48	23,96	16,59	1,38	1,25	67,70	51,46	1,91	1,73	48,47	57,72
CV (%)	4,82	7,58	4,20	6,53	20,00	37,42	19,65	38,73	21,27	17,48	9,22	6,89	28,15	21,43

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade não significativo, respectivamente. CV% = Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja. Cultivo II (C II) = II. Arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milho/soja). Controle = Sem aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos. FM = adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasill, 2020). Todos os tratamentos receberam aplicação de calcário e gesso agrícola.

No desdobramento das interações, a combinação do ‘mix’ com o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE reduziu a DS (1,33 kg dm⁻³) e o MBC (25,82 µg MBC g⁻¹ solo) na P1 (Figura 16a).

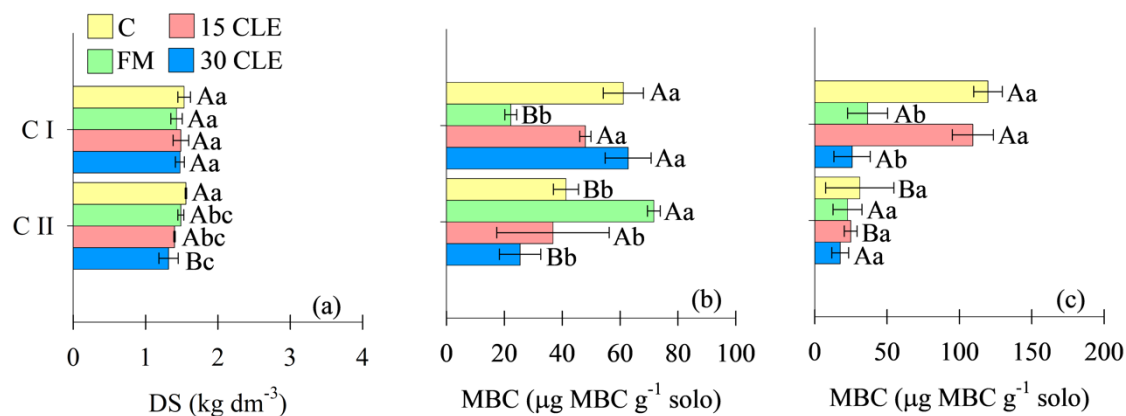


Figura 16. Respostas entre cultivos e manejos de adubação para a densidade do solo (DS) 0–0,1 m (a) e o carbono da biomassa microbiana (MBC) nas profundidades 0–0,1 m (b) e 0,1–0,2 m (c). Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz/feijão/milho/soja + “mix” de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, FM = Fertilizantes minerais– aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020).

De modo geral, as pontuações dos indicadores de saúde do solo responderam aos manejos de adubação e/o cultivos de plantas de cobertura. O residual da aplicação de 30 t ha⁻¹ de CLE aumentou a pontuação da DS na P1 e do pH e CT na P2 (Tabela 10).

A pontuação para a DS na P2 e da β–glucosidase na P1 foram maiores para o cultivo ‘mix’ em relação cultivo solteiro do capim-marandu (Tabela 10). As pontuações para o K foram maiores para os tratamentos FM na P1, não diferindo entre si (Tabela 10). Na mesma profundidade, em relação ao controle, os manejos de adubação reduziram as pontuações do MBC (Tabela 10).

Tabela 10. Pontuações (de 0 a 1) dos indicadores de saúde do solo – físico: densidade do solo (DS), químicos: pH, P, K e biológicos: β -glucosidase (β G), C total (CT) e C da biomassa microbiana (MBC) avaliados nas profundidades 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2).

Tratamentos	DS		pH _{CaCl2}		P		K		βG		CT		MBC	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
	— kg dm ⁻³ —				— mg dm ⁻³ —		— mg kg —		mg p-nitrofenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹		— % —		μg MBC g ⁻¹ solo	
<i>Adubação</i>														
Controle	0,29 ab	0,25 a	0,96 a	0,87 b	0,71 b	0,71 c	0,58 b	0,63 a	0,27 a	0,16 a	0,98 a	0,98 ab	0,43 a	0,24 a
FM	0,28 b	0,28 a	0,88 b	0,96 a	1,00 a	0,90 ab	0,78 a	0,61 a	0,41 a	0,21 a	0,98 a	0,97 b	0,05 b	0,13 b
15 t ha ⁻¹ de CLE	0,26 b	0,28 a	0,98 a	0,86 b	0,98 a	0,84 b	0,70 a	0,69 a	0,35 a	0,22 a	0,99 a	0,97 ab	0,06 b	0,16 b
30 t ha ⁻¹ de CLE	0,40 a	0,28 a	0,99 a	0,99 a	1,00 a	1,00 a	0,74 a	0,69 a	0,43 a	0,23 a	0,99 a	0,99 a	0,04 b	0,11 b
<i>Cultivo</i>														
C I	0,28 a	0,25 b	0,95 a	0,92 a	0,88 b	0,73 b	0,68 a	0,63 a	0,31 b	0,19 a	0,98 a	0,98 a	0,16 a	0,25 a
C II	0,34 a	0,30 a	0,96 a	0,91 a	0,96 a	0,99 a	0,73 a	0,68 a	0,43 a	0,23 a	0,99 a	0,97 a	0,13 a	0,07 b
<i>Teste F</i>														
Adubação (A)	4,73*	0,55 ^{NS}	13,32**	9,63**	127,98**	17,64**	8,30**	0,68 ^{NS}	1,77 ^{NS}	1,34 ^{NS}	2,27 ^{NS}	3,78*	107,91**	15,57**
Cultivo (C)	3,51 ^{NS}	5,62*	0,57 ^{NS}	0,27 ^{NS}	45,13**	78,45**	3,21 ^{NS}	1,17 ^{NS}	5,03*	1,87 ^{NS}	0,44 ^{NS}	2,60 ^{NS}	2,71 ^{NS}	158,52**
(A) x (C)	1,11 ^{NS}	0,51 ^{NS}	0,56 ^{NS}	1,90 ^{NS}	35,18**	16,88**	0,62 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,24 ^{NS}	1,71 ^{NS}	0,70 ^{NS}	0,82 ^{NS}	0,63 ^{NS}	21,46**
Média Geral	0,31	0,27	0,95	0,92	0,92	0,86	0,70	0,65	0,37	0,21	0,98	0,97	0,15	0,16
CV (%)	26,75	20,22	3,90	6,31	3,75	9,37	11,88	21,31	41,61	36,00	0,80	1,34	34,37	25,26

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade não significativo, respectivamente. CV% = Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja. Cultivo II (C II) = II. Arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalaria e milheto/soja). Controle = Sem aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos. FM = adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020). Todos os tratamentos receberam aplicação de calcário e gesso agrícola.

O C I e o C II, quando combinados com os manejos de adubação (mineral ou orgânica) exibiram as maiores pontuações (1 ou próximo de 1) para o P nas duas profundidades (Figuras 17a; 17b). Para o MBC, independente dos tratamentos, as pontuações foram inferiores a 0,5 (Figura 17c).

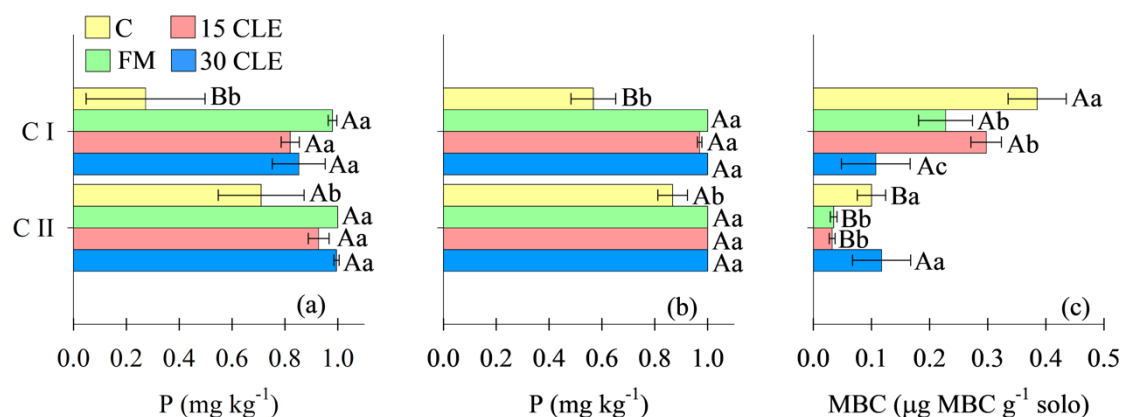


Figura 17. Respostas entre cultivos e manejos de adubação os scores de P 0–0,1 m (a), P 0,1–0,2 m (b) e carbono da biomassa microbiana (MBC) 0,1–0,2 m (c). Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milho/soja). DS = Densidade do solo, MBC = Carbono da biomassa microbiana. C = Controle, FM = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020).

Em relação aos índices de saúde de solo (SHI), o índice físico (SHI-F) apresentou a maior pontuação para o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE na P1 e para o cultivo ‘mix’ na P2 (Tabela 11). Na P1, houve redução do índice biológico (SHI-B) (Tabela 11). No desdobramento das interações, o índice químico (SHI-Q) apresentou maior sensibilidade aos manejos de adubação na P1, apresentando valores próximos a 1 (Figura 18a). Em relação ao índice biológico (SHI-B) na P2, este variou entre 0,39 a 0,50 (Figura 18c).

Tabela 11. Índices de saúde do solo (“Soil Health Index” – SHI) para as profundidades 0–0,1 m (P1) e 0,1–0,2 m (P2). SHI-F: físico, SHI-Q: químico e SHI-B: biológico.

Tratamentos	SHI-F		SHI-Q		SHI-B	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Adubação						
Controle	0,29 ab	0,25 a	0,74 b	0,73 c	0,55 a	0,46 a
FM	0,28 b	0,28 a	0,88 a	0,81 b	0,48 b	0,43 a
15 t ha ⁻¹ de CLE	0,26 b	0,28 a	0,88 a	0,79 bc	0,46 b	0,45 a
30 t ha ⁻¹ de CLE	0,40 a	0,28 a	0,90 a	0,88 a	0,48 b	0,44 a
Cultivo						
C I	0,28 a	0,25 b	0,83 b	0,75 b	0,48 a	0,47 a
C II	0,34 a	0,30 a	0,87 a	0,85 a	0,51 a	0,42 b
Teste F						
Adubação (A)	4,73*	0,55 ^{NS}	41,59**	13,91**	4,26*	1,03 ^{NS}
Cultivo (C)	3,51 ^{NS}	5,62*	19,54**	31,99**	2,28 ^{NS}	23,74**
(A) x (C)	1,11 ^{NS}	0,51 ^{NS}	8,47**	4,18*	0,33 ^{NS}	10,30**
Média Geral	0,31	0,27	0,85	0,81	0,49	0,44
CV (%)	26,75	20,22	3,65	6,03	11,29	6,63

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade não significativo, respectivamente. CV% = Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja. Cultivo II (C II) = II. Arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). Controle = Sem aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos. FM = adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020). Todos os tratamentos receberam aplicação de calcário e gesso agrícola.

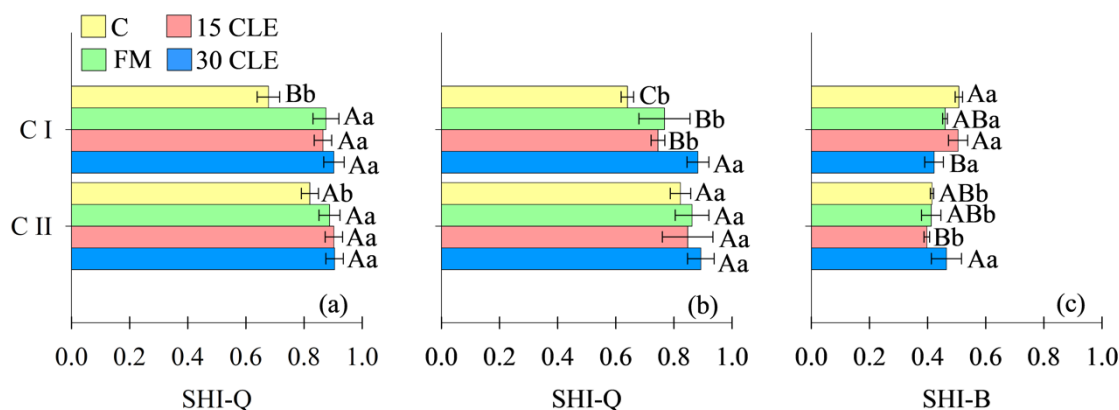


Figura 18. Respostas entre cultivos e manejos de adubação para os índices de saúde do solo SHI-Q 0–0,1 m (a), SHI-Q 0,1–0,2 m (b) e SHI-B 0,1–0,2 m (c). Médias seguidas da mesma letra maiúscula para cultivos (C I e C II) e minúsculas para manejos de adubação, para cada variável não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Cultivo I (C I) = Soja/milho/feijão/aveia/capim-marandu/trigo/capim-marandu/soja, Cultivo II (C II) = Arroz/feijão/milho/soja + mix de nabo forrageiro, crotalária e milheto/soja). C = Controle, FM = Adubação mineral convencional – aplicação de NPK+B (Cantarella et al., 2022). CLE = Composto de lodo de esgoto, doses acumuladas de três aplicações de 5 e 10 t ha⁻¹ (base úmida) – fertilizante orgânico registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuárias e Abastecimento (Brasil, 2020).

3.2. Relações entre a saúde do solo e a produtividade de soja

Na profundidade 0–0,1 m, a análise dos dois primeiros componentes principais, explicou 76,4% da variância dos dados (Tabela 12; Figura 19a). Na P2, a análise dos dois primeiros componentes principais, explicou 83,0% da variância dos dados (Tabela 12; Figura 19b).

Tabela 12. Cargas fatoriais para a análise de componentes principais para a produtividade de soja e índices de saúde do solo. SHI-F: Índice de saúde física, SHI-Q: Índice de saúde química, SHI-B: Índice de saúde biológica, Soja: Produtividade de grãos.

Parâmetros	Profundidade 0–0,1 m			
	PC1	PC2	PC3	PC4
SHI-F	0,47	0,75	-0,45	-0,04
SHI-Q	0,91	-0,07	0,13	0,39
SHI-B	-0,58	0,63	0,49	0,14
Soja	0,82	0,09	0,46	-0,31
Variância (%)	2,07	0,98	0,66	0,27
Variância acumulativa	51,76	24,68	16,74	6,81
Autovalores	51,76	76,44	93,18	100
Parâmetros	Profundidade 0,1–0,2 m			
	PC1	PC2	PC3	PC4
SHI-F	0,45	0,87	-0,14	-0,15
SHI-Q	0,85	-0,22	0,37	-0,27
SHI-B	-0,77	0,38	0,50	0,05
Soja	0,90	0,11	0,14	0,38
Variância (%)	2,34	0,97	0,43	0,25
Variância acumulativa	58,70	24,25	10,80	6,23
Autovalores	58,70	82,96	93,76	100

Os SHI e a produtividade de grãos de soja foram influenciados pelos manejos de adubação nas duas profundidades. Na P1, o gráfico biplot mostra o cluster 30 CLE englobando o SHI-F, SHI-Q e Soja (Figura 19a). O mesmo comportamento foi observado para a P2 (Figura 19b). Para a análise de correlação de Pearson entre os SHI e produtividade de soja, na profundidade de

0,0–0,1 m, houve correlação positiva entre o SHI-Q x Soja ($r = 0,68$; $p < 0,0001$) e correlação negativa entre o SHI-Q x SHI-B ($r = 0,46$; $p = 0,008$) (Figura 19c). Na profundidade de 0,1–0,2 m houve correlações positivas entre o SHI-Q x Soja ($r = 0,69$; $p < 0,0001$), SHI-F x Soja ($r = 0,43$; $p = 0,01$) e negativa SHI-Q x SHI-B ($r = -0,56$; $p = 0,001$) (Figura 19d).

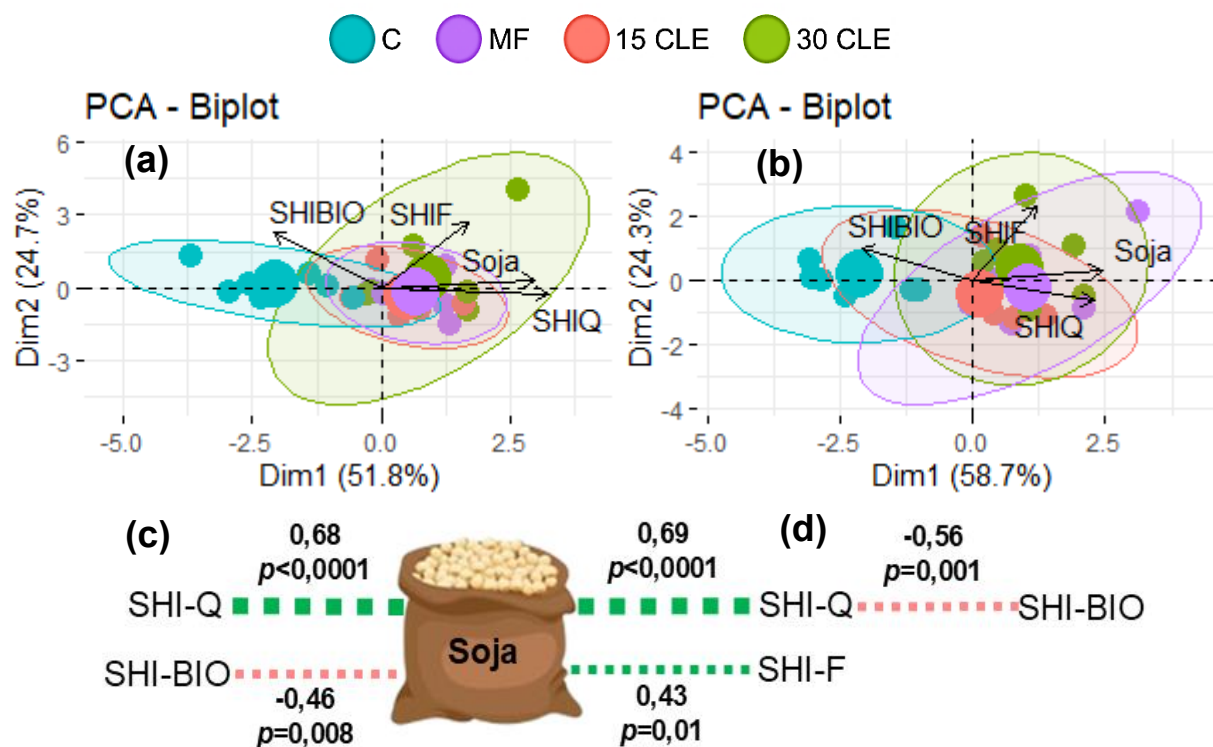


Figura 19. Análise de componentes principais entre índices de saúde do solo (SHI) e produtividade de grãos de soja nas profundidades de 0–0,1 m (a) e 0,1–0,2 m (b) e correlação de Pearson entre os SHI e produtividade de grãos de soja nas profundidades de 0–0,1 m (d) e 0,1–0,2 m (e).

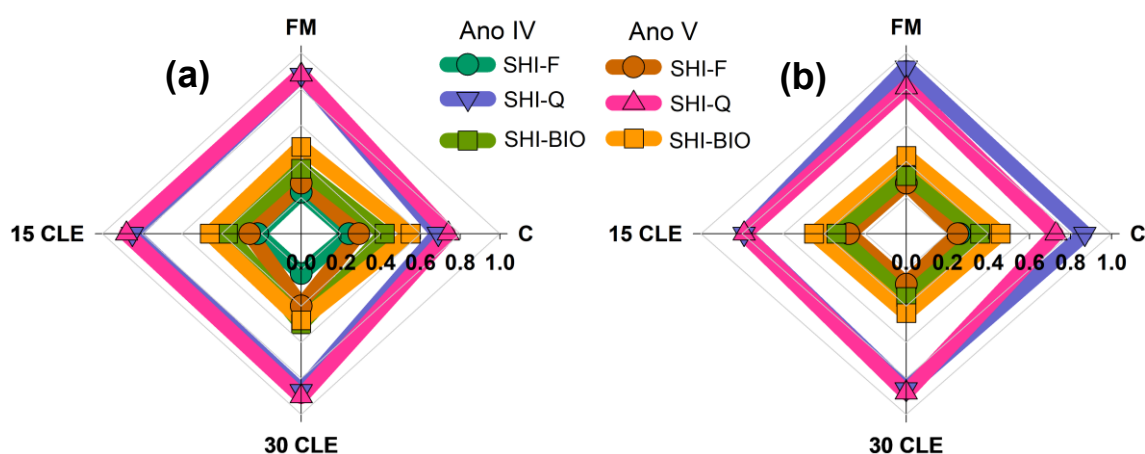


Figura 20. Esquema gráfico para os índices de saúde do solo no ano IV e ano V, em função dos manejos de adubação nas profundidades de 0–0,1 m (a) e 0,1–0,2 m (b).

4. DISCUSSÃO

4.1. Efeito dos manejos nos indicadores de saúde do solo

O experimento de campo, conduzido ao longo de seis anos, forneceu evidências positivas sobre o efeito residual de três aplicações de CLE e do cultivo de plantas de cobertura, especialmente o 'mix', com impactos diretos sobre os indicadores e pontuações. A aplicação de 30 t ha⁻¹ de CLE, em relação ao tratamento controle (sem adubação), incrementou o valor de pH em 4% (P1) e 7% (P2), o teor de K em 51% (P1) e o teor de P em 446% (P1) e 348% (P2) (Tabela 9). Além dos manejos de adubação, o C II incrementou o P no solo em 59,7% e 75% (P1 e P2, respectivamente) em relação ao C I (Tabela 9).

As maiores pontuações para os indicadores foram obtidas por meio do residual de 30 t ha⁻¹ de CLE para DS (P1) e para pH (P1 e P2) (Tabela 5). Independente das plantas de cobertura, os teores de K (P1) e de P (P1 e P2) apresentaram maiores pontuações quando houve adubação (Tabela 9). Os solos de Cerrado possuem características químicas que dificultam o cultivo de plantas, ou seja, baixo teor de MOS, elevada acidez e teor de Al trocável, ocasionando baixa disponibilidade de nutrientes (Alovisi et al., 2020). A adoção de práticas e manejos que reduzam essas características é fundamental para assegurar a saúde do solo (SS) e o sucesso no cultivo de plantas. Nossos resultados indicam que o CLE e o cultivo 'mix' podem ajudar a melhorar a SS, promovendo aumentos nos indicadores de qualidade, em ambas as profundidades.

O pH do solo é um indicador químico que impacta diversas propriedades do solo. Plantas com diferentes estratégias de crescimento, se desenvolvem melhor dentro de intervalos específicos de pH. De forma geral, para o cultivo agrícola em solos de Cerrado, este intervalo se situa entre 6,0 e 7,5 (Howe et al., 2024). Logo, os valores de pH em função do efeito residual do CLE, para as duas profundidades, estão dentro da faixa considerada adequada. Em relação ao P, a baixa disponibilidade e eficiência do nutriente em solos brasileiros, está principalmente relacionada à sua composição mineralógica (Silva et al., 2024). Como resultado, uma parte dos fosfatos aplicados no solo via fertilizantes minerais, pode ser rapidamente fixada, tornando-se indisponível para as plantas. O uso do CLE, que contém em média na sua composição 6,3 g kg⁻¹ de K⁺, 30,8

g kg⁻¹ de Ca²⁺, 8,8 g kg⁻¹ de Mg²⁺ e 14,3 g kg⁻¹ de P total (Tabela 2), podendo incrementar os teores disponíveis desses nutrientes no solo. Resultados semelhantes aos observados no presente estudo, para a mesma região, são relatados por Silva et al. (2022) que obtiveram incrementos de pH, P e K para aplicação de 5 t ha⁻¹ de CLE em um solo sob cultivo de cana-de-açúcar. Os autores enfatizam que o CLE pode ser utilizado como uma alternativa sustentável a adubação mineral em solos de Cerrado para o cultivo agrícola.

Além do manejo de adubação com CLE, o uso de plantas de cobertura combinadas em 'mix' podem auxiliar na manutenção dos níveis de P em diferentes profundidades. A utilização de plantas com características distintas pode potencializar o contato solo/raiz, uma estratégia importante para a absorção de nutrientes de baixa mobilidade no solo, como o P (Zhu et al., 2025). Logo, quanto maior o volume de raízes, maior área do solo explorada, o que pode resultar em maior absorção de P e, consequentemente, maior aproveitamento e disponibilidade deste nutriente por meio de sua ciclagem para as culturas subsequentes.

O cultivo 'mix' também pode impactar positivamente outros indicadores de saúde do solo, como os físicos. Neste estudo, a combinação de 30 t ha⁻¹ de CLE reduziu a DS do solo em 11% em comparação ao tratamento controle (Tabela 9) e maior pontuação em relação ao C I (Tabela 10). A DS é um indicador diretamente envolvido com outros parâmetros físicos, como a compactação, porosidade, armazenamento e o movimento de água e ar no solo, sendo, portanto, determinante para monitorar a SS (Silva et al., 2024). O manejo de plantas de cobertura associado a uma fonte de nutrientes, pode reduzir a DS. Em um experimento realizado a longo prazo, os autores relataram que o aumento da diversidade de plantas de cobertura, melhorou as propriedades físicas do solo em relação à monocultura em um SPD (Pott et al., 2023). Neste trabalho, os autores utilizaram uma combinação de seis espécies (aveia preta; nabo forrageiro; aveia branca; centeio; tremoço branco e ervilhaca) e verificaram redução de mais de 5% na DS em relação ao monocultivo apenas. Esses resultados corroboram com os encontrados no presente estudo, reforçando a premissa de que a combinação de espécies com diferentes características, são

mais eficazes na melhoria da saúde física do solo de Cerrado, ajudando a reduzir a compactação.

Além dos benefícios à saúde física, o cultivo 'mix' também beneficiou a saúde biológica do solo nas duas profundidades (Tabelas 9 e 10). O aumento da atividade da enzima foi de 17% em relação ao cultivo solteiro do campim-marandu (Tabela 9), conseqüentemente, gerando uma maior pontuação em a esse cultivo (Tabela 10). As enzimas são essenciais nos ciclos dos elementos no solo e, sendo sintetizadas principalmente pelos organismos que nele crescem, as condições que favorecem a atividade microbiana, como adubação orgânica, presença de plantas (rizosfera) e rotação de culturas, também favorecem a atividade enzimática (Carlos et al., 2023). A β -glucosidase está envolvida na conversão da celobiose em glicose, um açúcar de baixo peso molecular que serve como uma importante fonte de energia imediata para a microbiota (Carneiro et al., 2024). No solo, as plantas têm a capacidade de selecionar microrganismos específicos para sua rizosfera por meio da liberação de exsudatos variados (Fang et al., 2024). Isso pode resultar em diferenças nas comunidades microbianas presentes nas rizosferas de diferentes espécies que coexistem no mesmo solo (Sun et al., 2025). Assim, o aumento da atividade da β -glucosidase pode estar associado a uma maior diversidade microbiana, favorecida pela seleção das plantas presentes, o que, por sua vez, estimula as transformações e a atividade biológica nessa profundidade. Outro indicador que pode contribuir para a diversidade de microrganismos e a saúde biológica de solos, é o CT.

O CT foi favorecido pelo residual de 30 t ha⁻¹ em relação ao controle, em 15% na profundidade 0–0,1 m e em 5% na profundidade de 0,1–0,2 m (Tabela 9). O CLE utilizado como fertilizante orgânico tem em média 130,0 g kg⁻¹ de C (Tabela 7). Contudo, algumas condições podem contribuir para a rápida decomposição da MOS, o que pode ter reduzido o teor do CT no solo. Em um experimento de três anos em solo de região mediterrânea, foi observado que a aplicação de 12 t ha⁻¹ de CLE aumentou em 66% o acréscimo de CT no solo (Curci et al., 2020). Estes resultados diferem dos resultados encontrados no presente estudo. Em regiões tropicais, o impacto das mudanças climáticas, como aumento de temperaturas e padrões de precipitação alterados, pode afetar

o conteúdo de CT em solos de Cerrado. A adoção de práticas conservacionistas como SPD e o manejo de fertilizantes orgânicos, são estratégias que podem ser utilizadas para reduzir a perda de C em solos tropicais (Adekiya et al., 2023). Logo, nossos resultados demonstram que os manejos adotados para as condições presentes, contribuíram de forma positiva, não somente para a manutenção dos estoques de CT nas duas profundidades, como também para os indicadores químicos e físico do solo.

4.2. Relações entre os índices de saúde do solo e a produtividade de soja

Compreender e integrar as funções do solo pode fornecer informações valiosas sobre sua saúde. No entanto, sua capacidade de desempenhar funções e oferecer serviços ecossistêmicos é regulada não apenas por aspectos intrínsecos ao seu funcionamento, mas também por fatores como condições climáticas, práticas de manejo agrícola, entre outros (Garg et al., 2025). A utilização da ferramenta de avaliação dinâmica SMAF, mostrou que o residual de 30 t ha⁻¹ de CLE e o cultivo 'mix' impactaram de forma positiva o SHI-Q nas duas profundidades e o SHI-F na P1.

As práticas conservacionistas, que incluem o SPD e suas premissas, (*i.e.*, não revolvimento do solo, rotação de culturas, permanência da palhada remanescente), são indicadas para manter solos saudáveis em relação ao monocultivo (Karlen et al., 2019). No Brasil, o SPD é uma prática amplamente consolidada, com diversos estudos que evidenciam os seus benefícios para as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Llanillo et al., 2021; Besen et al., 2024; Fuentes-Matovani et al., 2024; Silva et al., 2024). Esses benefícios podem ser incrementados quando associados à diferentes estratégias de adubação. No entanto, a aplicação contínua de fertilizantes minerais pode ocasionar declínio da MOS, alteração do pH com ênfase particular para acidificação; aumento de pragas, redução da atividade e diversidade microbiana; poluição do solo, do ar e da água, bem como emissões de gases de efeito estufa (Singh; Sapkota, 2023). Como relatado por Prates et al. (2022) e Silva et al. (2022), o CLE pode ser utilizado como alternativa sustentável à adubação mineral convencional, promovendo incrementos nos atributos químicos no solo de Cerrado. No presente estudo, as pontuações do SHI-Q e a produtividade da

soja mostraram uma correlação positiva em ambas as profundidades (Figuras 7a, 7b, 8a e 8b). Esses resultados indicam que o SHI-Q foi o principal fator influenciador da produtividade de grãos. O manejo das plantas de cobertura pode ter contribuído para a ciclagem de três aplicações de CLE, mantendo teores adequados de nutrientes no solo, o que resultou em aumentos nos nutrientes e, consequentemente, em maiores rendimentos da soja.

Resultados semelhantes ao do presente estudo foram observados por Silva et al. (2023), para a produtividade de soja na mesma região. Os autores relatam maiores produtividades de grãos para o residual de 10, 20 e 25 t ha⁻¹ de CLE em uma sucessão feijão/capim-marandu/soja. No presente estudo, a combinação do cultivo 'mix' com o resíduo de 15 t ha⁻¹ de CLE (6297 kg ha⁻¹) superou a média nacional estimada para a produtividade de grãos de soja nesta safra, que foi de aproximadamente 3251 kg ha⁻¹ (Conab, 2023), além de superar também o tratamento com adubação mineral convencional (5351 kg ha⁻¹). Embora os estudos sobre os efeitos do CLE associado ao SPD na saúde do solo para esta região ainda sejam iniciais, nossos resultados contribuem para um avanço significativo na aplicação da *SMAF* em solos tropicais no contexto agrônomo. Eles não apenas demonstram que alinhar os princípios da economia circular com uma agricultura diversificada pode ser uma estratégia crucial para fortalecer a SS, mas também para aumentar a produtividade da soja.

A SS é impactada não apenas pelos diversos tipos de manejo, mas também por condições climáticas desfavoráveis. A irregularidade na distribuição das chuvas, combinada com altas temperaturas, impactou o SHI-B nas duas profundidades (Figuras 19a, 19b, 19c, 19d). A presença e atividade dos microrganismos no solo, são essenciais para a produção agrícola e para a preservação dos ecossistemas (Chen et al., 2024). Nas últimas décadas, alterações climáticas têm afetado a dinâmica e funcionalidade biológica dos solos tropicais (Ngaba et al., 2024). Na safra anterior à da soja, a região de estudo enfrentou uma estiagem, caracterizada por um período prolongado de baixa ou ausência de chuvas, combinado com altas temperaturas. Durante cerca de 120 dias, a média de precipitação foi de 4,71 mm e a temperatura média de 26°C. Essas mudanças podem ter afetado diretamente a biomassa microbiana do solo, que constitui uma parte significativa da MOS, e é altamente sensível às

variações causadas pelo manejo do solo, práticas agrícolas e, especialmente, por condições intrínsecas ao clima (Cai et al., 2025).

A biomassa microbiana pode imobilizar temporariamente C, N, P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes, que podem ser liberados após sua morte e decomposição, podendo tornar-se disponíveis as plantas (Costa et al., 2024). Logo, nossos resultados sugerem que parte dos nutrientes provenientes do CLE, que estavam retidos pelos microrganismos devido às condições presentes, pode ter sido rapidamente mineralizada, o que levou à redução do MBC e, conseqüentemente, ao decréscimo do SHI-B no ano anterior à safra de soja (Figura 20a; 20b). No entanto, a produção de biomassa do cultivo 'mix' de plantas de cobertura, juntamente com uma maior disponibilidade hídrica no ano seguinte, pode ter contribuído para mitigar e recuperar parte da biomassa microbiana comprometida. Além disso, de forma indireta, as plantas auxiliaram na ciclagem de nutrientes, resultando em benefícios para a soja.

Espera-se com os resultados obtidos neste estudo, fornecer informações inéditas sobre a SS e a produtividade de soja na região do Cerrado, por meio do cultivo de plantas de cobertura em manejo conservacionista e adubação com fertilizante orgânico a base de resíduo urbano. Tais resultados poderão servir de base para adequação da recomendação agrônômica de CLE, doses e frequência de aplicação desse fertilizante na adubação de sistemas, visando a redução de aporte de fontes minerais. Portanto, promover a otimização das práticas de manejo e, ao mesmo tempo, desenvolver critérios que auxiliem na recomendação do CLE como fertilizantes orgânico, poderá melhorar ainda mais a sustentabilidade da agricultura brasileira.

5. CONCLUSÕES

Os resultados confirmaram nossa hipótese de que o residual de três aplicações de CLE (30 t ha⁻¹), combinado com o manejo do 'mix' de plantas de cobertura (crotalária juncea, nabo forrageiro e milheto), é mais eficaz na melhoria da saúde do solo de Cerrado do que a associação com o cultivo 'solteiro' do capim-marandu. Em relação ao tratamento controle (sem adubação mineral ou orgânica), o residual de 30 t ha⁻¹ CLE incrementou os valores de pH em 4% e 7%

(0–0,1 e 0,1–0,2 m), o teor de K em 51% (0–0,1 m) o teor de P em 446% e 348% (0–0,1 e 0,1–0,2 m) e o CT em 15% e 5% (0–0,1 e 0,1–0,2 m). Em relação ao cultivo do capim-marandu, o ‘mix’ de plantas de cobertura incrementou o teor de P no solo em 446% e 348% (0–0,1 e 0,1–0,2 m) e a atividade enzimática da β -glucosidase em 19% (0–0,1 m). A combinação residual de 30 t ha⁻¹ CLE + ‘mix’, reduziu em 16% a DS (0,0–0,1 m).

Os índices de saúde do solo (SHI) gerados a partir dos indicadores pH, P, K, DS, β -glucosidase, CT e MBC influenciaram significativamente a produtividade de soja nas duas profundidades. O SHI-Q, nas duas profundidades, e o SHIF, na profundidade 0–0,1 m, se correlacionaram positivamente com a produtividade de grãos de soja. O SHI-B foi o indicador que apresentou maior sensibilidade ao período de baixa pluviosidade associado a altas temperaturas na safra anterior a soja. Este se correlacionou negativamente com o SHI-Q para as duas profundidades. No entanto, foi possível observar que o índice responde positivamente à combinação dos manejos de uma safra para outra. Entretanto, são necessários estudos adicionais para entender melhor sua resposta a longo prazo. Assim, nossos resultados ressaltam a importância das plantas de cobertura associadas à adubação orgânica na promoção de cultivos sustentáveis no Cerrado, contribuindo para a resiliência do sistema solo/planta frente às variações climáticas e assegurar a produtividade, saúde e a sustentabilidade ambiental em agroecossistemas tropicais.

REFERÊNCIAS

Adekiya AO, Alori ET, Ogunbode TO, Sangoyomi T, Oriade, OA (2023) Enhancing Organic Carbon Content in Tropical Soils: Strategies for Sustainable Agriculture and Climate Mitigation. **The open agriculture journal** 17: e18743315282476.

Alovisi AMT, Cassol CJ, Nascimento JS, Sorares NB, Silva Junior IR, Silva RS, Silva JAM (2020) Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brasil. **Geoderma Regional** 22: e00298.

Andrews SS, Karlen DL, Cambardella CA (2004) The Soil Management Assessment Framework-A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. **Soil & Water Management & Conservation** 68: 1945-1962.

Besen MR, Ribeiro RH, Bratti F, Locatelli JL, Schmitt DE, Piva JT (2024) Cover cropping associated with no-tillage system promotes soil carbon sequestration and increases crop yield in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research** 242: 106162.

Becker RK, Galvão CW, Etto RM, Hyeda D, Paula AL, Becker RK, Galvão CW, Etto RM, Hyeda D, Paula AL, Schiebelbein LM, Giarola NFB (2025) Assessing the impact of soil use and management systems on soil health in Southern Brazil. **Geoderma Regional** 40: e00932.

Bensen MR, Ribeiro RH, Bratti F, Locatelli JL, Schmitt DE, Piva JT (2024) Cover cropping associated with no-tillage system promotes soil carbon sequestration and increases crop yield in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, 242: 106162.

Blake GR, Hartge KH (1986) Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 1- Physical and mineralogical methods* (2 ed., pp. 363–382). Agronomy Monograph 9. Madison, WI: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America.

Bolan N, Srivastana P, Rao CS, Satyanaraya PV, Anderson GC, Bolan S, Nortjé GP, Kronenberg R, Bardhan S, Abbot LK, Zhao H, Mehra P, Satyanarayana SV, Khan N, Wang H, Rinklebe J, Siddique KHM, Kirkham MB (2023) Chapter Two – Distribution, characteristics and management of calcareous soils. **Advances in Agronomy** 182: 81-130.

Brasil (2020) Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizante em solos, e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.161, p. 265, 21 ago. Seção 1.

Brasil (2020b) Instrução normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed.134, p. 5, 15 jul. Seção 1.

Cai Y, Yang Y, Jiang J, Long T, Gu X, Guo Y, Li M, Xie Y (2025) Response of soil organic carbon stocks and soil microbial biomass carbon to natural grassland conversion: A global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, 965: 178481, 2025.

Carlos FS, Sousa RO, Nunes R, Carmona FC, Cereza T, Weinert C, Pasa EH, Bayer C, Camargo FAO (2023) Long-term cover crops and no-tillage in Entisol increase enzyme activity and carbon stock and enable the system fertilization in southern Brazil. **Geoderma Regional** 34: e00700.

Carneiro RG, Figueiredo CC, Malaquias JV, Mendes IC (2024) A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology** 198: 105394.

Chen Q, Song Y, An Y, Zhong G (2024) Soil Microorganisms: Their Role in Enhancing Crop Nutrition and Health. **Diversity** 16: 734, 2024.

Cherubin MR, Karlen DL, Cerri CEP, France ALC, Tormena CA, Davies CA, Cerri CC (2016) Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil **PLoS One** 11: e0150860.

Cherubin MR, Tormena CA, Karlen DL (2017) Soil quality evaluation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian oxisols with contrasting texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 41: e0160148, 2017.

Cherubin MR, Bordonal RO, Castioni GA, Guimarães EM, Lisboa IP, Moraes LAA, Menandro LMS, Tenelli S, Cerri CEP (2021) Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil (2021) **Industrial Crops & Products** 163: 113315.

Compainha Nacional de Abastecimento-Conab (2025) Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2023/2024, 6º Levantamento. Disponível em:< <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>>. Acesso em 16 de jan.

Conselho Nacional do meio ambiente-Conama (2006) Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Brasília, DF.

Costa RM, Araujo EMB, Silva, DEO, Rocha SMB, Bonifacio A, Sousa RS, Pereira APA, Medeiros EV, Sagrilo E, Oliveira Júnior JOL, Souza HA, Araujo ASF (2024) Seasonal responses of soil microbial biomass C and enzymatic activity comparing no-tillage and integrated crop-livestock systems. **European Journal of Soil Biology** 121: 103628.

Crespo C, Wyngaard N, Sainz Rozas H, Studdert GA, Barraco M, Gudelj V, Barbagelata P, Barbieri P (2021) Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. **CATENA** 207: 105690.

Curci M, Lavecchia A, Cucci G, Lacolla G, De Corato U, Crecchio C (2020) Short-Term Effects of Sewage Sludge Compost Amendment on Semiarid Soil. **Soil systems** 4.

Fang K, Kou YP, Tang N, Liu J, Zhang ZY, He HL, Xia RX, Zhao WQ, Li DD, Liu Q (2024) Differential responses of soil bacteria, fungi and protists to root exudates and temperature. **Microbiological Research** 286: 127829.

Farhangi-Abriz S, Ghassemi-Golezani K, Torabian S (2021) A short-term study of soil microbial activities and soybean productivity under tillage systems with low soil organic matter. **Applied Soil Ecology** 168: 104122.

Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental technical panel of soils (2015) **Status of the world's soil resources (SWSR)-Main Report**, Rome, Italy.

Fuentes-Llanillo R, Telles TS, Soares Junior D, Melo TR, Friedrich T, Kassam A (2021) Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research** 208: 104877.

Garg A, Kwakye S, Cates A, Peterson H, Labine K, Olson G, Sharma V (2025) Integrated soil health management influences soil properties: Insights from a US Midwest study **Geoderma** 455: 117214.

Gura I, Mnkeni PNS (2019) Crop rotation and residue management effects under no till on the soil quality of a Haplic Cambisol in Alice, Eastern Cape, South Africa. **Geoderma** 337: 927–934.

Howe JA, Mcdonald MD, Burke J, Robertson I, Coker H, Gentry TJ, Lewis KL (2024) Influence of fertilizer and manure inputs on soil health: A review. **Soil Security** 16: 100155.

International platform for biodiversity and ecosystem services-IPBES (2018) **The assessment report on: Land Degradation and Restoration. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**. MONTANARELLA, L.; SCHOLLES, R.; BRAINICH, A. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, 744 p.

Karlen DL, Veum KS, Sudduth KA, Obrycki JF, Nunes MR (2019) Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil & Tillage Research** 195: 104365.

Karlen DL, Veum KS, Sudduth KA (2019) Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil and Tillage Research** 195: 104365.

Li Y, Sun B, Deng T, Lian P, Chen J, Peng X (2021) Safety and efficiency of sewage sludge and Garden waste compost as a soil amendment based on the field application in woodland. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 222: 112497.

Lombardi Neto F, Drugowich M (1994) **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. Campinas: CATI, 2: 168.

Mantovani GG, Pellini T, Bordin I, Telles TS (2024) No-Tillage and Conservation Agriculture Adoption by Farmers in Southern Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology** 67: e24230806.

Menegat S, Ledo A, Tirado R (2022) Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. **Scientific Reports** 12: 14490.

Nelson DW, Sommers LE (1963) Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. (Book Series, 5) 322-331.

Ngaba MJY, Uwiragive Y, Hu B, Zhou J, Dannermann M, Calanca P, Bol R, Vries W, Kuzyakov Y, Rennenber H (2024) Effects of environmental changes on soil respiration in arid, cold, temperate, and tropical zones. **Science of The Total Environment**, v.952, 175943, 2024.

Pott CA, Conrado PM, Rampim L, Umburanas RC, Conrado AMC, Outeiro VH, Muller MML (2023) Mixture of winter cover crops improves soil physical Properties under no-tillage system in a subtropical environment. **Soil and Tillage Research** 234: 105854.

Prates AR, Kawakami KC, Coscione AR, Teixeira Filho MCM, Arf O, Abreu-Junior CH, Oliveira FC, Moreira A, Galindo FS, He Z, Jani AD, Capra GF, Ganga A, Nogueira TAR (2022) Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on na Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land** 11: 1246.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Guaggio JA (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1.ed. Campinas: Instituto Agrônômico 285 p.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Guaggio JA, Furlani AMC (1997) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas 285 p.

Sarto MVM, Borges MWLB, Sarto JRW, Rice CW, Rosolem CA (2020) Root and shoot interactions in a tropical integrated crop-livestock-forest system. **Agricultural Systems** 181: 102796.

Shulman P, Lopes Filho LC, Basilio JP, Barbosa ET, Tormen N, Nunes RS, Altmann N, Moura JB, Lobo Junior M (2025) Cover crops as a strategy for root rot management in common beans: Effects on crop performance and root microbial dynamics in a Cerrado soil. **Rhizosphere** 33: 101015.

Spliethoff J, Rampim L, Pott CA (2019) Desempenho de plantas de cobertura e milho em diferentes associações de manejo mecânico e biológico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** 14.

Silva LJR, Sandim AS, Silva APR, Deus ACF, Antonangelo JA, Bull LT (2024) Evaluating the Agronomic efficiency of alternative phosphorus sources Applied in Brazilian soils. **Scientific reports** 14: 8526.

Silva RS, Jalal A, Nascimento REN, Elias NC, Kawakami KC, Abreu-Júnior CH, Oliveira FC, Jani AD, He Z, Zhao F, Teixeira Filho MCM, Rosseto R, Capra GF, Nogueira TAR (2022) Composted Sewage Sludge Application Reduces Mineral Fertilization Requiriments and Improves Soil Fertility in Sugarcane Seedling Nurseries. **Sustainability** 14: 4684.

Silva PST, Garcia NS, Galindo FS, Arf O, Nogueira Tar, Jani AD, Cassiolato AMR (2024) *Azospirillum brasilense* Inoculation in a Maize-*Urochloa*-Rice Cropping System Promotes Soil Chemical and Biological Changes and Increases Productivity. **Crops** 4: 211–226.

Silva JAG, Habermann E, Costa KAP, Silva LM, Severiano EC, Costa AC, Silva FG, Oliveira TC, Diário BMM, Vilela L, Costa JVCP, Martinez CA (2024) Integration crop-livestock system increases the sustainability of soybean cultivation through improved soil health and plant physiology. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 359: 108770.

Silva MB, Carmargos LS, Teixeira Filho MCM, Souza LA, Coscione AR, Lavres J, Abreu-Júnior CH, He Z, Zhao F, Jani AD, Capra GG, Nogueira TAR (2023) Residual effects of composted sewage sludge on nitrogen cycling and plant metabolism in no-till common bean-palisade grass-soybean rotation. **Frontiers in Plant Science** 14.

Silva PLF, Tormena CA, Echer FR, Cagna CP, Rocha CH, Lima RP (2024) Cover crops influence the physical hydric quality a tropical sandy soil under no-tillage cotton cropping. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 48: e0240026.

Singh B, Sapkota TB (2023) The effects of adequate and excessive application of mineral fertilizers on the soil. **Encyclopedia of Soils in the Environment** 3: 369-381.

Sun Q, Zheng Y, Li S, Yang J, Zhao X, Du L, He K, Liu J (2025) Diversified crop rotation: Synergistically enhancing peanut yield and soil organic carbon stability. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 382: 109497.

Tabatabai MA (1994) Soil Enzymes. In “Methods of Soil Analysis – Part 2 Microbiological and Biochemical Properties” (R. W. Weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. Bezdicsek, S. Smith, M. A. Tabatabai, A. Wollum, eds.), pp. 786-944. SSSA, Madison, WI.

Topa D, Cara IG, Jitareanu G (2021) Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis. **CATENA** 199: 105102.

Vance ED, Brookes PC (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, 19: 703–707.

Wang J, Zhen J, Hu W, Chen S, Lizaga I, Zeraatpisheh M, Yang X (2023) Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. **International Soil and Water Conservation Research**, 11: 429-454.

Wienhold BJ, Karlen DL, Andrews SS, Stott DE (2009) Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). **Renewable Agriculture Food Systems** 24: 260–266.

Wulanningtyas HS, Gong Y, Li P, Sakagami N, Nishiwaki J, Komatsuzaki M (2021) A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil and Tillage Research** 205: 104749.

Young MD, ROS GH, Vries W (2021) Impacts of Agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 319: 107551.

Zheng G, Yu B, Wang Y, MA C, Chen T (2021) Fate and biodegradation characteristics of triclocarban in wastewater treatment plants and sewage sludge composting processes and risk assessment after entering the ecological environment. **Journal of Hazardous Materials** 412: 125270.

Zhu S, MAO H, Sun S, Yang X, Zhao W, Sheng L, Chen Z (2025) Arbuscular mycorrhizal fungi promote functional gene regulation of phosphorus cycling in rhizosphere microorganisms of *Iris tectorum* under Cr stress. **Journal of Environmental Sciences** 151: 187–199.