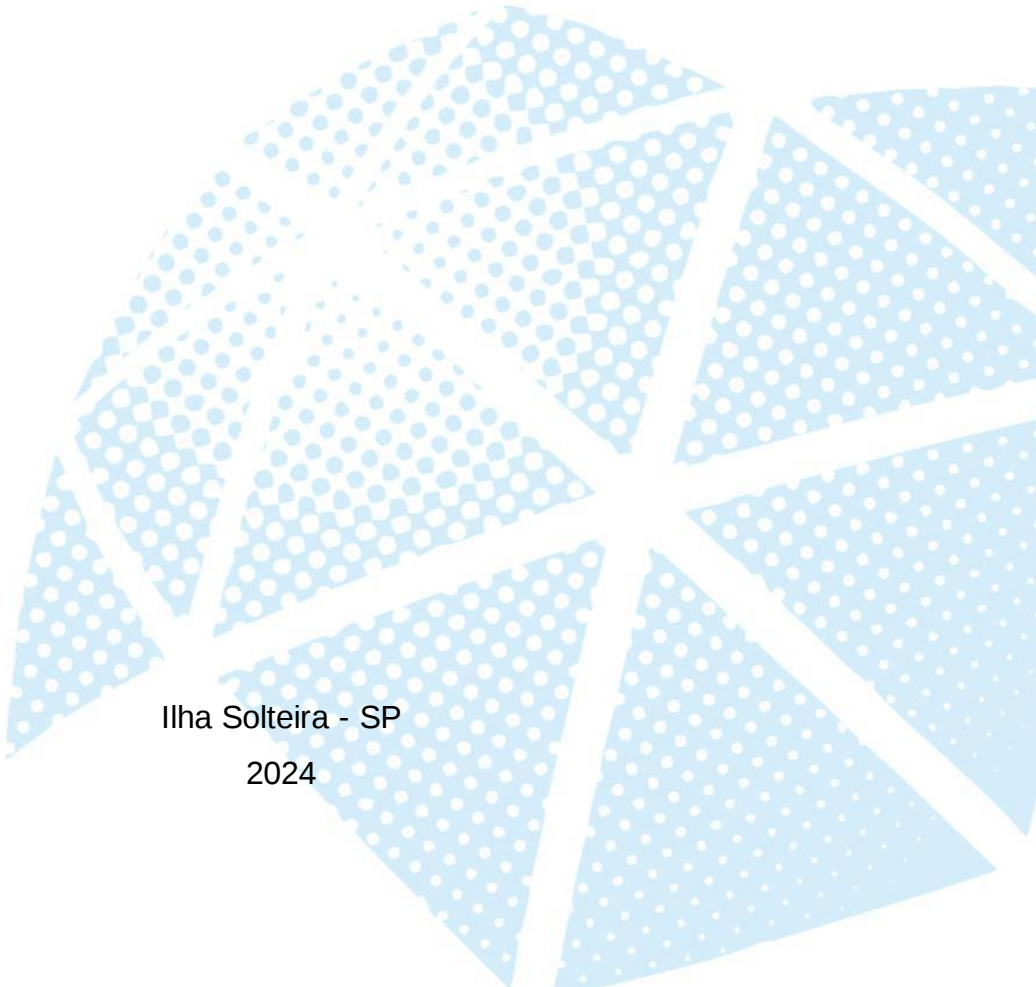


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

RAFAEL DOS SANTOS SILVA

**FERTILIDADE DO SOLO, VARIÁVEIS TECNOLÓGICAS E AGRONÔMICAS DA
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB ADUBAÇÃO ORGÂNICA E MINERAL**

Ilha Solteira - SP
2024



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RAFAEL DOS SANTOS SILVA

**FERTILIDADE DO SOLO, VARIÁVEIS TECNOLÓGICAS E AGRONÔMICAS DA
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB ADUBAÇÃO ORGÂNICA E MINERAL**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

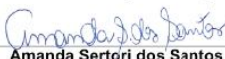
S586f Silva, Rafael dos Santos.
Fertilidade do solo, variáveis tecnológicas e agronômicas da cana-de-açúcar cultivada sob adubação orgânica e mineral / Rafael dos Santos Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
107 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Inclui bibliografia

1. *Saccharum officinarum* L. 2. Compostagem. 3. Fertilizantes. 4. Economia circular. 5. Lodo de esgoto. 6. Nutrição de plantas.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/IL-9081
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O manejo da fertilidade do solo é crucial para otimização dos rendimentos da cultura da cana-de-açúcar. Ao analisar a combinação de fertilizantes orgânicos, como o composto de lodo de esgoto, com fertilizantes minerais, esta pesquisa apresenta inovações sobre práticas agrícolas sustentáveis. A utilização de fertilizante orgânico, diminui a dependência de fertilizantes minerais e melhora a produtividade e a qualidade do solo e da cultura da cana-de-açúcar, promovendo um manejo mais sustentável e resilientes para a indústria sucroenergética.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Soil fertility management is crucial for optimizing sugarcane crop yields. By examining the combination of organic fertilizers, such as composted sewage sludge, with mineral fertilizers, this research offers innovations in sustainable agricultural practices. The use of organic fertilizers reduces the dependence on mineral fertilizers and improves the productivity and quality of sugarcane, promoting more sustainable and resilient management for the sugar-energy industry.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: FERTILIDADE DO SOLO, VARIÁVEIS TECNOLÓGICAS E AGRONÔMICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB ADUBAÇÃO ORGÂNICA E MINERAL

AUTOR: RAFAEL DOS SANTOS SILVA

ORIENTADOR: THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciencia do Solo / Faculdade de Ciencias Agrarias e Veterinarias - UNESP

Prof. Dr. SALATIER BUZETTI (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. RONALDO DA SILVA VIANA (Participação Virtual)
Departamento de Producao Vegetal / Faculdade de Ciencias Agrarias e Tecnologicas - UNESP

Dr. SÉRGIO GUSTAVO QUASSI DE CASTRO (Participação Virtual)
Departamento de Experimentação e Consultoria Agrônômica Aplicada / AgroQuatro-S

Prof. Dr. CÁSSIO HAMILTON ABREU-JUNIOR (Participação Virtual)
Divisão de Produtividade Agroindustrial e Alimentos / Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP

Ilha Solteira, 20 de agosto de 2024

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA**
Data: 21/08/2024 09:01:23-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **SALATIER BUZETTI**
Data: 21/08/2024 20:37:17-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **RONALDO DA SILVA VIANA**
Data: 27/08/2024 09:10:35-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO GUSTAVO QUASSI DE CASTRO**
Data: 27/08/2024 09:59:51-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **CASSIO HAMILTON ABREU JUNIOR**
Data: 27/08/2024 17:33:15-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria dos Santos Sousa (*in memoriam*), que sempre foi meu maior exemplo de determinação e perseverança. Seu apoio incondicional e seus esforços para me proporcionar a melhor educação foram fundamentais para minha jornada. Sua lembrança continua a me inspirar e a me impulsionar a seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me agraciar com a vida, saúde, entendimento e sabedoria, além de sempre me acompanhar.

À minha querida família: minha amada esposa Estela e meus filhos Mateus e Gabriel. Vocês, abaixo de Deus, são minha base e fonte de inspiração. Amo vocês!

Ao meu irmão, Raydon Santos, minha cunhada Carla Santos e seus filhos Lorenzo e Miguel, pelo apoio e confiança.

À minha Sogra Maria de Fátima, que me recebeu de braços abertos em sua família e que não mede esforços para me ajudar, orientar e apoiar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, pela confiança, paciência e conselhos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Um profissional de excelência.

Ao Dr. Fernando Carvalho Oliveira, da Biossola Agricultura e Ambiente Ltda e Tera Ambiental, pela parceria no desenvolvimento da pesquisa.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira (FEIS/Unesp), pela oportunidade concedida por meio do Curso de Pós-graduação, que contribuiu significativamente para minha formação científica e profissional.

Aos colegas do Grupo de Estudos em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), pela disposição em colaborar, pelo trabalho em equipe e pela união em prol do grupo. Em especial, agradeço à Raimunda Eliane, Nathércia Castro e Rodrigo pelo grande apoio. Desejo a vocês todo o sucesso possível.

À usina Vale do Paraná S/A - Álcool e Açúcar, pela confiança e por permitir meu crescimento profissional e pessoal, concedendo-me a oportunidade de conciliar o estudo com a jornada de trabalho.

Aos meus líderes na Usina Vale do Paraná, Alberto José Otoyá Dussan (Diretor Geral), Vicente Estuardo Esquit Donis (Gerente Agrícola), por quem tenho grande estima e respeito.

À nova gestão da Usina Vale do Paraná, agora Companhia de Melhoramento Norte do Paraná (CMNP), por continuar contribuindo positivamente com a execução deste trabalho mesmo após o meu desligamento.

Sou grato a todos pela contribuição direta ou indireta para a conclusão deste sonho. A recíproca é verdadeira.

RESUMO

O composto de lodo de esgoto (CLE), utilizado como fertilizante orgânico, pode ser uma fonte alternativa para melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade da cana-de-açúcar e reduzir o uso de fertilizantes minerais. No presente estudo, objetivou-se avaliar a fertilidade do solo, além de variáveis tecnológicas e agronômicas da cana-de-açúcar (RB867515) cultivada sob adubação orgânica e mineral. O experimento foi desenvolvido em condições de campo, utilizando o delineamento experimental em blocos casualizados, com 11 tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos constituem-se de doses de CLE (0,0, 2,5; 5,0 e 7,5 t ha⁻¹, base úmida), associadas ou não com 50% e 100% da adubação mineral convencional (AMC) recomendada para a cultura e um tratamento com 100% de AMC e sem aplicação de CLE. Nas safras 2020/21 e 2021/22, na colheita da cultura, foram coletadas amostras de solo (0,00–0,25 m e 0,25–0,50 m de profundidade) para avaliação da fertilidade (MO, pH, CTC, H+Al, Al, SB, V, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn). O estado nutricional, a produtividade e a qualidade tecnológica (°Brix, ATR, POL e TAH) da cana-de-açúcar também foram avaliados. Na 1ª e 2ª soca, nas duas profundidades, as doses de 5,0 a 7,5 t ha⁻¹ de CLE incrementaram os atributos MO, SB, CTC e V, além de aumentarem os teores de P, K, Ca, Mg, B, Cu e Zn no solo. A aplicação de CLE permite uma redução de até 50% na adubação mineral de soqueira. A dose de 5,0 t ha⁻¹ de CLE promoveu um incremento de 20% na produtividade em relação a adubação mineral. O efeito residual da associação de 7,5 t ha⁻¹ de CLE com 50% da AMC incrementou em 10% a produtividade em relação ao tratamento com 100% de AMC. Nas duas soqueiras, essas mesmas doses promoveram adequada nutrição das plantas e incrementaram o TAH. Conclui-se que o CLE pode ser utilizado como fonte complementar à adubação mineral na produção da cultura da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum* L; compostagem; fertilizantes; economia circular; lodo de esgoto; nutrição de plantas.

ABSTRACT

Organic fertilization in sugarcane cultivation using composted sewage sludge (CSS) could be an alternative for improving soil fertility and increasing productivity while reducing the need for mineral fertilizers. In this context, the aim of this study was to evaluate soil fertility as well as the agronomic responses of sugarcane cultivated under organic and mineral fertilization in a commercial production system. The experiment was conducted under field conditions using a randomized complete block design with 11 treatments and four replications. The treatments consisted of CSS application rates (0.0, 2.5, 5.0, and 7.5 Mg ha⁻¹, wet basis) associated with 50% or 100% of conventional mineral fertilization (CMF) and one treatment with 100% of CMF. During the 2020/21 and 2021/22 harvest seasons, soil samples (0.00–0.25 m and 0.25–0.50 m depth) were collected at the end of the crop cycle to assess fertility parameters (OM, pH, CEC, H+Al, Al, BS, BS, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, and Zn). Nutritional status (K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, and Zn), productivity (Mg ha⁻¹ of cane), and technological quality (°Brix, ATR, POL, and TAH) of the RB867515 sugarcane variety were evaluated. Results indicated that applying CSS at rates of 5.0 to 7.5 Mg ha⁻¹ significantly increased the concentration of P, K, Ca, Mg, B, Cu, and Zn in the soil. This effect was observed through the increase in OM, SB, CEC, and BS attributes in the first and second ratoons. Additionally, CSS application allowed for a reduction of up to 50% in the amount of mineral fertilizers needed to achieve high productivity levels. Specifically, a rate of 5.0 Mg ha⁻¹ of CSS increased productivity by 20% compared to mineral fertilization alone. The residual effect of 7.5 Mg ha⁻¹ CSS combined with 50% CMF increased productivity by 10% compared to mineral fertilization alone. These rates also promoted increased TAH in both the first and second ratoons. In conclusion, CSS can be used as a complementary source to mineral fertilization in the commercial production of sugarcane, as this organic fertilizer can meet the crop's nutritional needs. Such management practices promote sustainability through the responsible management of urban waste.

Keywords: *Saccharum officinarum* L; composting; fertilizers; circular economy; sewage sludge; mineral plant nutrition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área experimental (a), unidade experimental e suas dimensões (b).....	41
Figura 2 – Médias mensais da precipitação pluvial (mm), da umidade relativa do ar (%) e da temperatura (°C) máxima, média e mínima registradas durante o cultivo da cana-de-açúcar. Dados coletados da estação climática da Faculdade de Engenharia da Unesp, Ilha Solteira	42
Figura 3 - Matéria orgânica – MO (a), acidez ativa – pH (b), acidez potencial – H+Al (c), soma de bases – V (f) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,00–0,25 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos.....	51
Figura 4 - Matéria orgânica – MO (a), acidez ativa – pH (b), acidez potencial – H+Al (c), soma de bases – SB (d) capacidade de troca catiônica – CTC (e) e saturação de bases – V (f) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,25–0,50 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos	53
Figura 5 - Teores de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) e S (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,00–0,25 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos	56
Figura 6 - Teores de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) e S (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,25–0,50 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos	58
Figura 7 - Teores de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,0–0,25 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos	60
Figura 8 - Teores de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,25–0,50 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos	62
Figura 9 - Localização da área experimental (município de Suzanópolis, São Paulo, Brasil) e representação esquemática de uma única parcela com a individuação da "área útil" para coleta de dados do solo e da planta.....	76
Figura 10 - Médias mensais da precipitação pluvial (mm), da umidade relativa do ar (%) e da temperatura (°C) máxima, média e mínima registradas durante o cultivo da	

cana-de-açúcar. Dados coletados da estação climática da Faculdade de Engenharia da Unesp, Ilha Solteira	78
Figura 11 - Teor de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na folha diagnose da cultura da cana-de-açúcar em resposta aos tratamentos e anos de cultivo	84
Figura 12 - Teores de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) na folha diagnose da cultura da cana-de-açúcar em resposta aos tratamentos e anos de cultivo	88
Figura 13 - Brix% caldo (a), açúcar total recuperável (ATR) (b), produtividade de açúcar em toneladas de açúcar por hectare (TAH) (c) e porcentagem de sacarose da cana (Pol% cana) (d) em resposta aos tratamentos e anos de cultivo.....	91
Figura 14 - Produtividade de cana de açúcar em toneladas de colmos por hectare (TCH), em resposta aos tratamentos.....	92
Figura 15 - Análise de regressão de N foliar na 1ª e 2ª soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha ⁻¹ , base úmida)	93
Figura 16 - Análise de regressão de Mg foliar na 1ª e 2ª soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha ⁻¹ , base úmida)	94
Figura 17 - Análise de regressão de B foliar na 1ª e 2ª soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha ⁻¹ , base úmida)	94
Figura 18 - Mapa de calor com as correlações de Pearson entre as variáveis de atributos químicos do solo, teores de nutrientes no solo, produtividade e qualidade tecnológica da planta	95
Figura 19 - Correlograma evidenciando a distribuição e correlação entre TCH (Tonelada de Cana por Hectare) e TAH (Tonelada de Açúcar por Hectare) na cultura da cana-de-açúcar	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos físicos ^a e químicos ^b das amostras de solo coletadas na área experimental nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade (média ± desvio padrão, $n = 3$	43
Tabela 2 - Composição dos tratamentos estudados na presente pesquisa.....	44
Tabela 3 - Análise de regressão de atributos químicos de solo de amostras coletadas nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade, após a colheita da cana-açúcar 1 ^a e 2 ^a soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha ⁻¹ , base úmida.....	50
Tabela 4 - Atributos físicos ^a e químicos ^b das amostras de solo coletadas na área experimental nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade (média ± desvio padrão, $n = 3$).....	77
Tabela 5 - Composição dos tratamentos estudados na presente pesquisa.....	79
Tabela 6 - Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMC	Adubação mineral convencional
ATR	Açúcares Total Recuperável
CLE	Composto de lodo de esgoto
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSS	Composted sewage sludge
LE	Lodo de Esgoto
PIB	Produtos Interno Bruto
POL	Teor de sacarose aparente
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total
ST	Sólidos Totais
TAH	Toneladas de açúcar por hectare
TCH	Toneladas de cana por hectare
TDV	Folha mais alta com colarinho visível

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	14
1.1	INTRODUÇÃO	14
1.2	REVISÃO DE LITERATURA	16
1.2.1	Panorama nacional da produção da cana-de-açúcar	16
1.2.2	Uso estratégico da adubação orgânica na cultura da cana-de-açúcar ...	17
1.2.3	Composto de lodo de esgoto e seus efeitos na fertilidade do solo.....	18
1.2.4	Fertilizante a base de lodo de esgoto na agricultura-cana.....	20
	REFERÊNCIAS	23
2	FERTILIDADE DE SOLO TROPICAL CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR E REDUÇÃO NO USO DE FERTILIZANTES MINERAIS EM RESPOSTA À ASSOCIAÇÃO COM FERTILIZANTE ORGÂNICO A BASE DE LODO DE ESGOTO	37
2.1	INTRODUÇÃO	38
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
2.2.1	Descrição da área experimental	41
2.2.2	Delineamento experimental e tratamentos	43
2.2.3	Caracterização do composto de lodo de esgoto	44
2.2.4	Desenvolvimento e histórico do experimento	45
2.2.5	Análise dos atributos químicos do solo.....	47
2.2.6	Análise estatística.....	47
2.2.7	Resultados e Discussão	47
2.3	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64
3	ESTADO NUTRICIONAL, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR ADUBADA COM COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO E FERTILIZANTES MINERAIS	72
3.1	INTRODUÇÃO	74
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	76
3.1.1	Delineamento experimental e tratamentos	78
3.1.2	Caracterização do composto de lodo de esgoto	79
3.1.3	Histórico do experimento e desenvolvimento da cultura	81
3.1.4	Análise dos teores de nutrientes, análise tecnológica e produtividade .	82

3.1.5	Análise estatística.....	82
3.1.6	Resultados e discussão	83
3.2	CONCLUSÃO	97
	REFERÊNCIAS	98

1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia, aliada à necessidade de mitigar os impactos ambientais decorrentes da utilização de fontes não renováveis, tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis e eficientes na produção de biomassa e energia, com grande importância para a segurança alimentar (FAO, 2021; ICLEI, 2023; Agency, 2024). A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* L.) se destaca como uma promissora fonte de energia renovável. Além de sua elevada produtividade e versatilidade na produção de diversos produtos derivados (etanol, açúcar, energia, torta de filtro e vinhaça) contribui significativamente para redução das emissões de gases de efeito estufa (Corrêa, 2022; Epifanio, 2023; Filho *et al.*, 2023; Reis, Santos e Gomes, 2023).

Para alcançar altos níveis de produtividade, o cultivo de cana-de-açúcar demanda uma atenção especial às suas necessidades nutricionais. Isso inclui o fornecimento adequado de corretivos de solo, gesso agrícola e fertilizantes (Castro, 2022; Freire *et al.*, 2022; Garcia e Mendes, 2022; Raizer *et al.*, 2022).

A demanda por fertilizantes minerais na produção agrícola, tanto em nível nacional quanto mundial, tem aumentado significativamente nas últimas décadas, refletindo a necessidade de aumentar a produtividade agrícola para atender à crescente demanda por alimentos. Em 2023, estima-se que cerca de 194 milhões de toneladas de fertilizantes foram consumidas globalmente, representando aumento de 1,8% em relação ao ano de 2022 (FAO, 2023). Esse crescimento é impulsionado pelo aumento populacional, mudanças nos hábitos alimentares e degradação do solo, tornando-se um grande desafio para a produção agrícola (Brasil, 2023; FAO, 2023; FAO *et al.*, 2023). No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar já ocupa uma área de 8,6 milhões de hectares, com uma produção média de 79 t ha⁻¹, estando entre as espécies cultivadas que mais utilizam fertilizante minerais quando comprado a outras culturas como milho, café e algodão. Por outro lado, o Brasil depende significativamente da importação de fertilizantes, com cerca de 85% dos fertilizantes utilizados no país sendo provenientes de mercados internacionais (Maфра, 2022). Além do mais, o Brasil ocupa a quarta posição no ranking mundial de consumo de fertilizantes, ficando atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos. O país é responsável por aproximadamente 8% do consumo global de fertilizantes (Brasil, 2021; Brasil, 2022; ANDA, 2024). Esta dependência expõe o agronegócio brasileiro a riscos significativos, como crises que

podem comprometer a produção agrícola e a segurança alimentar (Brasil, 2022a). Para mitigar esses riscos, o Plano Nacional de Fertilizantes tem como foco principal a busca por fontes alternativas e a redução da dependência de insumos importados (Brasil, 2021a). Entre as medidas adotadas, destaca-se o incentivo ao uso de adubação alternativa orgânica, que não só diminui a necessidade de fertilizantes minerais, mas também promove a sustentabilidade agrícola (Santos e Glass, 2018; Velden, van der *et al.*, 2022)

Para enfrentar esses desafios de maneira sustentável, será fundamental a adoção de práticas agrícolas que promovam a eficiência no uso de fertilizantes, a conservação do solo e a proteção do ambiente. O uso de fertilizantes orgânicos como fonte de matéria orgânica (MO) e de nutrientes de plantas oferece múltiplos benefícios. Além de fornecer os elementos essenciais para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, contribui para a melhoria da estrutura do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e nutrientes, e promove a atividade biológica, essencial para a saúde do ecossistema do solo, além de armazenar grandes quantidade de carbono auxiliando na mitigação das mudanças climática (Gomes *et al.*, 2019; Alves, 2020; Oliveira, 2022; Moraes *et al.*, 2023).

Fertilizantes orgânicos a base de lodo de esgoto emergem como alternativas promissoras, podendo substituir parcialmente os fertilizantes minerais, diminuindo os custos de produção e os impactos ambientais, além de promover uma disposição final mais sustentável para os lodos (Doss e Sivakumar, 2022; Silva *et al.*, 2022a; Souza, Silva, *et al.*, 2023). O composto de lodo de esgoto (CLE) vem sendo estudado em diversas culturas (feijão, soja, milho, cana e outras), sendo observado melhorias nos atributos químicos do solo, aumentos dos teores de N, P, Cu, Mn e Zn no solo e nas plantas, além de ganhos de produtividades (Oliveira *et al.*, 2023). Por outro lado, ainda são escassas informações sobre o uso combinado de CLE com os fertilizantes minerais.

Diante do exposto, tem-se como hipótese que a associação do fertilizante orgânico a base de lodo de esgoto com fontes minerais, além de melhorar a fertilidade do solo e as variáveis tecnológicas e agronômicas da cana, contribuirá para a redução do fornecimento de fertilizantes minerais. Assim, objetivou-se com esta pesquisa, avaliar a fertilidade do solo, o estado nutricional, a produtividade e qualidade tecnológica da cana soca após a aplicação do CLE associado ou não à adubação mineral.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Panorama nacional da produção da cana-de-açúcar

A produção da cana-de-açúcar (*Saccharum L.*) no Brasil desempenha um papel crucial no cenário social, econômico e ambiental, destacando-se pela sua relevância na promoção da sustentabilidade. O país é líder mundial na produção e exportação dessa cultura, com produção de 610,1 milhões de toneladas de cana e 40.893,4 milhões de toneladas de açúcar (Café, Peixoto e Tambas, 2022; CONAB, 2023; Guerra, 2023a). A expansão da cana-de-açúcar no território nacional foi impulsionada principalmente pela demanda crescente por biocombustíveis, aliada às condições climáticas favoráveis e à extensão territorial adequada para o cultivo (Alves; Teixeira, 2023; Nitsch, 2023).

A região Centro-Sul do Brasil concentra a maior parte da produção nacional, 88% da área plantada, especialmente, nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul (CONAB, 2023). Essa região é conhecida por suas condições climáticas favoráveis, como o clima tropical e a presença de solos férteis, que favorecem o desenvolvimento da cultura e contribuem para altos índices de produtividade (Rolim *et al.*, 2007; Reboita *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2018). Outras regiões do país também se destacam na produção de cana-de-açúcar, como o Nordeste, onde o Estado de Pernambuco é o líder regional. Apesar das condições climáticas mais adversas, o Nordeste brasileiro tem investido na expansão da cultura, impulsionado principalmente pelo crescimento da demanda por etanol e pela diversificação das fontes de energia renovável (Ramos, 2021; Vidal, 2021).

O setor sucroenergético brasileiro tem passado por transformações significativas nas últimas décadas, com investimentos em tecnologia e sustentabilidade (Franco, 2022; Rodrigues e Rodrigues, 2022; Filho e Oliveira, 2023). Novas variedades de cana-de-açúcar mais produtivas e resistentes a doenças têm sido desenvolvidas, sendo a variedade RB867515, a que mais superou desafios (alta produtividade, resistência a pragas e doenças, e boa brotação), contribuindo para aumentar a eficiência do setor (Oliveira; Barbosa; Daros, 2021; Oliva; Jacometti, 2023). Além disso, práticas agrícolas sustentáveis, como a utilização de técnicas de plantio, manejo e conservação do solo por meio de práticas conservacionistas, controle biológico, colheita em verde, geração de energia e utilização dos resíduos para adubação orgânica, são essenciais para a preservação ambiental e a

sustentabilidade da produção agrícola (Ferraz, 2022; Leal, 2022; Damacena; Cunha, 2023).

Mesmo diante dos progressos obtidos, o setor enfrenta desafios significativos relacionados à adubação, visando otimizar a produtividade agrícola (Av; Deokate; Somvanshi, 2022; Rossetto *et al.*, 2022). A modernização da infraestrutura logística e de transporte é crucial para garantir o acesso oportuno e eficiente aos insumos fertilizantes. Além disso, é urgente buscar por alternativas inovadoras que promovam o uso mais racional e eficiente na aplicação dos fertilizantes, visando reduzir desperdícios e minimizar impactos ambientais (Carrer *et al.*, 2022; Castro *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2022).

O Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) é uma estratégia fundamental do governo brasileiro para aumentar a produção nacional de fertilizantes e reduzir a dependência das importações, que atualmente atendem a grande parte da demanda interna (Caligaris *et al.*, 2022). Um dos pontos notáveis do PNF é a promoção do uso de fontes orgânicas de fertilização, uma prática já bem estabelecida nos canaviais brasileiros. A aplicação de resíduos como vinhaça, bagaço, torta de filtro e esterco tem se mostrado eficaz não apenas na melhoria da fertilidade do solo, mas também na redução de custos e no aumento da sustentabilidade ambiental do setor sucroenergético (Filho e Cesar, 2023; Ogino e Gasques, 2023).

1.2.2 Uso estratégico da adubação orgânica na cultura da cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar representa uma das principais culturas agrícolas do Brasil e um dos pilares da economia nacional, especialmente devido à sua versatilidade na produção de açúcar, etanol e bioenergia (Dias, 2021; Tolentino, 2021; CONAB, 2023). Nesse cenário, a adubação orgânica tem sido cada vez mais reconhecida como uma prática fundamental para melhorar a fertilidade e a qualidade do solo, além de aumentar a produtividade da cultura (Cardoso *et al.*, 2021; Abreu, 2022; Kalil, 2022).

Diversos autores indicam que a adoção da adubação orgânica na cultura da cana-de-açúcar não se limita apenas à redução do uso de fertilizantes minerais, mas também envolve uma série de benefícios adicionais, como: melhoria da estrutura do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água, promovendo a biodiversidade microbiana e reduzindo a erosão e a compactação do solo (Nogueira *et al.*, 2013;

Curci *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2020; Prates *et al.*, 2022a; Silva *et al.*, 2022a; Oliveira *et al.*, 2023).

O solo é o maior reservatório de carbono terrestre, armazenando mais carbono que a atmosfera e a vegetação combinadas (Rumpel e Chabbi, 2021). A quantidade de carbono armazenada no solo depende de vários fatores, incluindo práticas de manejo agrícola, uso da terra e condições climáticas (Mendes *et al.*, 2021; Tenelli *et al.*, 2021). As práticas agrícolas que promovem a adição de matéria orgânica ao solo, como a adubação orgânica, são essenciais para aumentar o estoque de carbono orgânico do solo (SOC) e, conseqüentemente, reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) (Herzfeld *et al.*, 2021; Mirzaei *et al.*, 2024).

Dentre os tipos de adubação orgânica utilizados na cultura da cana-de-açúcar, destacam-se o composto da torta de filtro, composto de cama de frango, composto de esterco bovino e o composto de lodo de esgoto. Esses resíduos orgânicos são ricos em matéria orgânica (MO) e nutrientes (i.e., N, P, K e micronutrientes) fundamentais para o adequado desenvolvimento das plantas e podem ser utilizados de forma complementar ou combinada para atender às necessidades nutricionais da cana-de-açúcar (Guimarães *et al.*, 2016; Dias, 2019; Batista, 2021; Silva *et al.*, 2021; Kohler *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022a).

A adubação orgânica também se alinha com práticas de economia circular, ao utilizar resíduos que, de outra forma, causariam impactos nocivos ao ambiente. Além disso, a decomposição lenta e a mineralização dos nutrientes presentes nesses adubos oferecem uma fonte duradoura de fertilização, essencial para culturas de ciclo longo como a cana-de-açúcar (Rossetto e Santiago, 2022). A utilização de fertilizante orgânico a base de lodo de esgoto sanitário, também conhecido como biossólido surge como alternativa promissora. A integração do lodo de esgoto na adubação orgânica pode contribuir significativamente para a fertilidade do solo e a sustentabilidade ambiental, ligando diretamente a gestão de resíduos urbanos com a produtividade agrícola (Chojnacka *et al.*, 2023; Sugurbekova *et al.*, 2023).

1.2.3 Composto de lodo de esgoto e seus efeitos na fertilidade do solo

No Brasil, aproximadamente 114,8 milhões de habitantes são atendidos pela rede coletora de esgoto. No total, 87,5% dos municípios brasileiros contam com sistemas de esgotamento sanitário. Segundo o levantamento do Sistema Nacional de Informação do Saneamento (SNIS), coleta-se um volume de 6,0 bilhões de m³ de

esgoto por ano, deste volume, 4,9 bilhões de m³ recebem o devido tratamento nas estações coletoras (Brasil, 2022a; b). Os avanços tecnológicos no tratamento de esgoto possibilitam a reutilização da água após o processo de tratamento, o que permite que ela seja devolvida aos corpos d'água receptores (Silveira, 2021).

Juntamente com coleta e tratamento de esgoto, surge um desafio ambiental significativo, a produção do lodo de esgoto (LE) nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Embora não haja um consenso sobre o volume total anual de LE, estima-se que a produção anual de lodo de esgoto varia entre 1,8 a 2,5 milhões de toneladas de matéria seca (Pedroza *et al.*, 2010; KNOPIK, 2020; Feng *et al.*, 2023). Diante desse cenário, a destinação adequada desse resíduo torna-se crucial para evitar impactos negativos ao ambiente (Achon e Cordeiro, 2015; Guerra e Angelis, 2021; Yusuf e Junior, 2023). O LE pode ser destinado de diversas formas, sendo os métodos mais comuns a disposição em aterros sanitários, a incineração e o uso agrícola (Bozza e Marchiori, 2020; Madeiro *et al.*, 2022; José Junior, 2023; Montezuma, 2023).

Dentre essas opções, o uso agrícola como matéria-prima na elaboração de fertilizante orgânico tem ganhado destaque, especialmente o CLE, devido aos benefícios que pode oferecer ao solo e às plantas (Nogueira *et al.*, 2007, 2008; Rodrigues e Filho, 2023; Silva *et al.*, 2023). O CLE contém nutrientes, N, P, K, B, Cu, Fe, Mn e Zn, que são importantes para o desenvolvimento das culturas agrícolas (Chagas, 2021; Arrobas *et al.*, 2024; Balkrishna *et al.*, 2024; Vítková *et al.*, 2024). Além disso, seu uso na agricultura promove a reciclagem de nutrientes e pode reduzir a dependência de fertilizantes minerais, contribuindo para a sustentabilidade do sistema agrícola (Camps-Sagué *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024).

Estudos têm demonstrado que o CLE pode melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade das culturas e até mesmo reduzir a erosão do solo (Toffey e Brown, 2020; Owen, Davis e Aydilek, 2021; Elgarahy *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2022a). No entanto, é importante ressaltar que o uso de LE no solo e como matéria-prima na produção de compostos agrícolas requer atenção às normas estabelecidas por órgãos competentes.

No Brasil, a Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que regulamentava o uso agrícola do LE, foi atualizada passando a vigorar a Resolução nº 498/2020 (Brasil, 2006, 2020a). Ainda em âmbito nacional, a normativa Nº 61 de julho de 2020 do Ministério da Agricultura, Pecuária e

Abastecimento (MAPA), atribui regras específicas para a elaboração de fertilizantes orgânicos (Brasil, 2020b).

Classificado como fertilizante orgânicos classe B pela normativa nº 61 do MAPA, o CLE representa uma fonte de nutrientes segura para agricultura, pois apresenta baixo teor de contaminantes e patógenos, minimizando os riscos à saúde humana e ambiental (Brasil, 2020b). Por outro lado, o aumento da fertilidade do solo proporcionado pelo uso de CLE ocorre mediante a liberação gradual dos nutrientes presentes, devido à sua decomposição biológica ao longo do tempo, tornando-os disponíveis para as plantas de forma contínua ao longo do ciclo de cultivo (Eid *et al.*, 2021; Picariello *et al.*, 2021; Silva, W. R. *et al.*, 2021). Além da disponibilidade de nutrientes o CLE aumenta a capacidade de retenção de água, a capacidade de troca de cátions (Delibacak, Voronina e Morachevskaya, 2020; Głąb *et al.*, 2020). Tais fatores permitem uma condição favorável para o crescimento radicular e absorção de nutrientes pela planta. Dessa forma haverá o incremento na produção de biomassa, uma variável de impacto na produtividade (Balaganesh *et al.*, 2020).

1.2.4 Fertilizante a base de lodo de esgoto na agricultura-cana

Com a crescente demanda na produção de alimentos e de matéria-prima para sobrevivência humana, estima-se que no ano de 2050, a demanda por alimentos aumente em torno de 70%. Isso traz uma preocupação crescente sobre os recursos naturais não renováveis, com destaque para a degradação dos solos, uma vez que cerca de 1/3 toda superfície terrestre encontra-se sob este efeito. Além disso, há elevada produção de resíduos urbanos e industriais estimados em mais de 3,4 bilhões de toneladas (Hunter *et al.*, 2017; Kaza *et al.*, 2021). Uma forma de reduzir os efeitos da poluição ambiental é realizando o tratamento destes resíduos.

O lodo de esgoto (LE), material pastoso constituído principalmente por água, matéria orgânica e elementos minerais, pode ser utilizado na agricultura como fertilizante orgânico e condicionador do solo (Moraes *et al.*, 2023). Porém, antes de ser utilizado nas atividades agrícolas, o LE deve ser tratado e estabilizado, respeitando as diretrizes da Resolução nº 498/2020 do CONAMA em que será classificado como apto ou não para a aplicação em solos de acordo com sua composição (Brasil, 2020a). Diversos estudos têm demonstrado a eficácia do uso do LE compostado na agricultura (Lima *et al.*, 2020; Keherwald, 2021; Araújo *et al.*, 2022; Viana, 2022). A aplicação do LE como alternativa orgânica ou organomineral mostrou-

se eficaz para potencializar o crescimento de culturas, como grão-de-bico, tomate-cereja, milho e alface. No caso do grão-de-bico, sua eficácia agrônômica foi superior em comparação ao fertilizante mineral NPK (Viana, 2022). Há relatos de aumento na produção de mais de 60% no tomate-cereja após a utilização do LE (Hossain *et al.*, 2010).

Uma cultura muito importante para a economia brasileira é a cana-de-açúcar, pois é a principal matéria-prima para a produção de açúcar e álcool e além de possuir o potencial de gerar grande quantidade de energia limpa e renovável. Para alcançar níveis elevados de produtividade, esta cultura demanda altas quantidades de nutrientes, principalmente N, P e K. Tradicionalmente esses nutrientes são supridos pelo uso de fertilizantes minerais provenientes do exterior. A elevada necessidade nutricional da cultura é consequência da alta produção de biomassa por área e da remoção de grande parte dessa massa vegetal na colheita (Moraes *et al.*, 2023).

Dessa forma, o manejo adequado das adubações é de suma importância para prolongar a vida útil dos canaviais. Uma vez que os fertilizantes desempenham um papel fundamental no fornecimento de nutrientes para a cana-de-açúcar, garantindo seu rendimento e longevidade. Ao aplicar adubos de maneira sustentável e econômica, é possível maximizar o número de ciclos de cortes e rebrotas da cana, promovendo assim a produtividade do canavial em longo prazo (Mosaic, 2022).

Para a produção de 120 toneladas de massa de matéria fresca, que equivale a aproximadamente 100 toneladas de colmos industrializáveis os níveis de acumulação de nutrientes na parte aérea das plantas deve ser de em média 150, 40, 180, 90, 50 e 40 kg de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente (Oliveira *et al.*, 2017). A utilização de fertilizantes minerais tem impactado significativamente no custo de produção prejudicando a sustentabilidade e a eficiência econômica de produção agrícola (ALLAM *et al.*, 2022). O uso do CLE se apresenta como uma alternativa viável e sustentável, sendo que estudos sobre fertilizantes organominerais na cultura da cana-de-açúcar demonstraram que o CLE pode substituir parcial ou totalmente os fertilizantes minerais, contribuindo para a redução dos resíduos das agroindústrias (Sousa, 2014; Souza *et al.*, 2020).

Ao avaliar a produtividade e a qualidade da cana-de-açúcar em função de adubações com fertilizante organomineral à base de lodo de esgoto e adubação mineral, Moraes *et al.* (2023) constataram que ambas as variedades apresentaram semelhanças na produção de açúcares e na qualidade superior do caldo da cana.

Além disso, esses autores afirmaram que o uso de fertilizante organomineral é não só viável e sustentável, mas também contribui para a ciclagem de nutrientes na cultura da cana-de-açúcar.

Benefícios decorrentes da utilização de fertilizante orgânico a base de LE e seu impacto positivo no aumento da produtividade das culturas têm sido objeto de extensa discussão no campo da agricultura. Moreira *et al.* (2020), ao conduzirem uma análise sobre o estado nutricional do milho e seus parâmetros fisiológicos, constataram que a aplicação do LE resultou em um aumento significativo da atividade fotossintética e da condutividade estomática do milho, quando comparada com a aplicação de fertilizante mineral. Adicionalmente, observou-se que o uso do LE promoveu o incremento da MO do solo, elevou o pH e aumentou os teores de Ca, Mg e S no solo. Além disso, os teores de macronutrientes na parte aérea da planta foram superiores, o que promoveu maior atividade fotossintética, condutividade estomática e melhores parâmetros de produtividade para o milho. Outros autores sustentam a existência de uma forte associação entre a atividade fotossintética das plantas e o suprimento adequado de nutrientes (Baioui *et al.*, 2017).

Apesar de ainda pouco aplicado nas lavouras brasileiras, pesquisas já demonstraram os impactos positivos do uso do LE têm indicado que a aplicação de 100 t ha⁻¹ de LE tem exercido o crescimento das plantas mediante o incremento da biomassa das plantas e o aumento da atividade enzimática (fosfatase alcalina e desidrogenase) do solo, tal efeito proporcionou aumento na produtividade de grãos de diversas culturas, tais como milho (521%), trigo (129%), cevada (124%) e colza (150%), quando comparadas às plantas cultivadas em áreas que não receberam aplicação desse subproduto. Esse efeito benéfico é atribuído à liberação gradual e lenta dos nutrientes ao longo do tempo, resultando em um efeito residual prolongado (Siebielec, Siebielec e Lipski, 2018); Diante desse cenário, o LE como matéria prima para elaboração de fertilizantes orgânicos como o CLE, torna-se uma alternativa importante e viável para o enriquecimento nutricional de diversas culturas (Albuquerque *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2020; Zabotto, 2020). Desse modo, a investigação sobre o uso desse fertilizante na cultura da cana-de-açúcar é oportuna e muito relevante.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. S. **Fertilização com bioativo composto em cana-de-açúcar de terceiro corte**. 2022. 33 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, MS, 2022.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA - Lei 12.305/2010. *In*: EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO, 19., 2015, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas: ASSEMAE, 2015
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Clean Energy Transitions Programme**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 6 abr. 2024.
- ALBUQUERQUE, H. C. De; ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; ZONTA, E.; BARBOSA, C. F. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 553–559, jun. 2015.
- ALVES, A. S. **Adubação orgânica e manutenção da palhada na cana-de-açúcar: efeitos na volatilização de amônia, parâmetros químicos e físicos do solo e produtividade**. 2020. 54 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal) - Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2020.
- ALVES, P. H. N.; TEIXEIRA, W. C. BIOCOMBUSTÍVEIS: Trajetória histórica e o horizonte de oportunidades no Brasil. **Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica**, Juiz de Fora, v. 5, n. 2, 18 dez. 2023.
- ARAÚJO, V. D. S.; SILVA, M. O.; BRITO, A. S. D.; SOUSA, I. D. L.; NUNES, F. C.; SOUZA, J. F. M. D.; OLIVEIRA, I. V. D.; SILVA, C. R. D.; CARVALHO, F. I. M.; SILVA, J. N. D.; SILVA, V. F. A.; SILVA, P. A. Lodo de esgoto e suas potencialidades agrícolas. **Research, Society and Development**, Itabira, MG, v. 11, n. 3, p. e14711326200, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/26200>. Acesso em: 6 abr. 2024.
- ARROBAS, M.; MENESES, R.; GUSMÃO, A. G.; SILVA, J. M. Da; CORREIA, C. M.; RODRIGUES, M. Â. Nitrogen-rich sewage sludge mineralized quickly, improving lettuce nutrition and yield, with reduced risk of heavy metal contamination of soil and plant tissues. **Agronomy**, Basel, v. 14, n. 5, p. 924, mai. 2024.
- AV, K.; DEOKATE, N.; SOMVANSHI, R. Knowledge and adoption of sugarcane production technology. **The Pharma Innovation**, New Delhi, v. 11, p. 5, 2022. Disponível em: <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue12/PartN/11-12-152-648.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2024.
- BAIOUI, R.; GHNAYA, T.; WALI, M.; ZAIER, H.; GHABRICHE, R.; MNASRI, M.; ZORRIG, W.; ABDELLY, C. Agricultural valorization of domestic sewage sludge:

Impact on growth, photosynthesis, nutrition and toxic metal accumulation in *Medicago sativa*. **Agrochimica**, Pisa, v. 61, n. 1, 31 mar. 2017.

BALAGANESH, P.; VASUDEVAN, M.; SUNEETHKUMAR, S. M.; SHAHIR, S.; NATARAJAN, N. Evaluation of Sugarcane and Soil Quality Amended by Sewage Sludge Derived Compost and Chemical Fertilizer. **Nature Environment and Pollution Technology**, Pune, v. 19, n. 4, p. 1737–1741, 1 dez. 2020.

BALKRISHNA, A.; BANERJEE, S.; GHOSH, S.; CHAUHAN, D.; KAUSHIK, I.; ARYA, V.; SINGH, S. K. Reuse of Sewage Sludge as Organic Agricultural Products: An Efficient Technology-Based Initiative. **Applied and Environmental Soil Science**, London, v. 2024, 7 fev. 2024.

BATISTA, F. F. **Qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar fertilizada com fontes mineral e organomineral associadas à bioestimulante**. 2020. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 21 jan. 2021.

BOZZA, N. G.; MARCHIORI, L. F. S. Utilização do Lodo de Esgoto como Adubo na Cultura da Cana de Açúcar. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, Piracicaba, v. 10, n. 1, p. 8-21, 4 ago. 2020. ISSN: 2236-9171.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2006. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/FIGURAS/CRSS/CONAMA/CONAMA_375_2006.pdf. Acesso em: 4 mai. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2020a. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=797. Acesso em: 4 mai. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020**. Brasília, DF: Secretaria de Defesa e Agropecuária, 2020b.

BRASIL. 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, DF, 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretária Nacional de Saneamento - SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral**. Brasília, DF: SNS, 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a->

informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/agua-e-esgotos-1/2021. Acesso em: 26 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. **Levantamento da ANA aponta aumento expressivo no número de estações de tratamento de esgotos no Brasil**. Brasília, DF: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/levantamento-da-ana-aponta-aumento-expressivo-no-numero-de-estacoes-de-tratamento-de-esgotos-no-brasil>. Acesso em: 26 abr. 2024b.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento. Brasília, DF: Conama, 2006. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-3752--006_103464.html. Acesso em: 29 abr. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA nº 61, de 08 de julho de 2020**. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, 2020. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=398558>. Acesso em: 29 abr. 2023.

CAFÉ, S. A. R.; PEIXOTO, A. C. B.; TAMBAS, M. D. Análise de swot da sustentabilidade na produção de cana de açúcar, açúcar etanol de alagoas: um estudo de caso da usina Coruripe. **REVEXT - Revista de Extensão da UNEAL**, Arapiraca, v. 7, n. 2, p. 11–17, 24 dez. 2022.

CALIGARIS, B. S. A.; RANGEL, L. E. P.; POLIDORO, J. C.; FARIAS, P. I. V. A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v.31, n. 1, p. 03-08, 2022.

CAMPS-SAGUÉ, F.; LAVAQUIOL, B.; BOSCH-SERRA, À. D.; MOLINA, M. G.; DOMINGO-OLIVÉ, F. Sustainability Assessment after Twenty Years of Sewage Sludge Application on Calcareous Soil Following N or P Criterion. **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 6, p. 2304, jan. 2024.

CARDOSO, B. C.; PALAVICINI, A. L. S.; MANTOVANI, A.; CHIAMOLERA, D. L.; ZILIO, M.; FELICIO, T. P. Rendimento de cana-de-açúcar e graus Brix em função de diferentes formas de adubação. **Scientific Electronic Archives**, Sinop, v. 14, n. 4, 2021.

CARRER, M. J.; FILHO, H. M. De S.; VINHOLIS, M. De M. B.; MOZAMBANI, C. I. Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, New York, v. 177, p. 121510, 1 abr. 2022.

CASTRO, S. A. Q. De. **Aproveitamento do N-fertilizante (N-ureia) pela cana-de-açúcar aplicado por via foliar no período de máximo crescimento da cultura em complemento à adubação de solo**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola

Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

CHAGAS, J. K. M. **Efeito temporal do biochar de lodo de esgoto nos indicadores de fertilidade e ambientais do solo.** 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.

CHOJNACKA, K.; SKRZYPCZAK, D.; SZOPA, D.; IZYDORCZYK, G.; MOUSTAKAS, K.; WITEK-KROWIAK, A. Management of biological sewage sludge: Fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 326, p. 116602, 15 jan. 2023.

COMPANHIA DE NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**, Brasília, v. 11, n. 3, p. 56, 2023. cana-de-açúcar - Safra 2023/24

CORRÊA, P. M. **Produtividade de cana-de-açúcar para a região de Catanduva-SP.** 2022. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2022.

CURCI, M.; LAVECCHIA, A.; CUCCI, G.; LACOLLA, G.; DE CORATO, U.; CRECCHIO, C. Short-Term Effects of Sewage Sludge Compost Amendment on Semiarid Soil. **Soil Systems**, Basel, v. 4, n. 3, p. 48, set. 2020.

DAMACENA, P. S. de S.; CUNHA, M. C. da. Práticas de conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar, na bacia hidrográfica córrego da onça - Jataí/Goiás. **Geoambiente On-line**, Jataí, n. 45, 2023. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/74320>. Acesso em: 29 abr. 2023.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A. DE; ZAMBON, J. L. C.; BESPALHOK FILHO, J. C. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar.** Curitiba: Ridesa Brasil, 2010a.

DELÍBACAK, S.; VORONINA, L.; MORACHEVSKAYA, E. Use of sewage sludge in agricultural soils: Useful or harmful. **Eurasian Journal of Soil Science**, Samsun, v. 9, n. 2, p. 126–139, 1 abr. 2020.

DIAS, F. M. F. Alguns elementos sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil. **Geosul**, Florianópolis, v. 36, n. 79, p. 116–142, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e73805>. Acesso em: 29 abr. 2023.

DIAS, L. A. **Cama de frango na cultura da cana-de-açúcar revisão bibliográfica.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Agronomia) - Universidade Brasil, Descalvado, SP, 2019.

DOSS, M. M. N.; SIVAKUMAR, G. Impact of enriched bio digested bone sludge compost on the yield and economics of sugarcane. **The Pharma Innovation**, New Delhi, v. 11, n. 11, p. 1247-1249, 2022.

EID, E. M.; SHALTOUT, K. H.; ALAMRI, S. A. M.; ALRUMMAN, S. A.; HUSSAIN, A. A.; SEWELAM, N.; RAGAB, G. A. Sewage sludge enhances tomato growth and improves fruit-yield quality by restoring soil fertility. **Plant, Soil and Environment**, Praga, v. 67, n. 9, p. 514–523, 30 set. 2021.

ELGARAHY, A. M.; ELOFFY, M. G.; PRIYA, A. K.; YOGESHWARAN, V.; YANG, Z.; ELWAKEEL, K. Z.; LOPEZ-MALDONADO, E. A. Biosolids management and utilizations: A review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 451, p. 141974, 20 abr. 2024.

EPIFANIO, H. R. **A importância da produção de açúcar no brasil**: revisão sobre os aspectos socio-econômico-ambientais do processo produtivo do açúcar no brasil. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2023**: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. Rome: FAO, 2023.

FAO, F. **Marco estratégico para 2022-2031**. [S. l.]: FAO, p. 44, 2021.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023**: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. Rome, Italy: FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2023.

FENG, J.; BURKE, I. T.; CHEN, X.; STEWART, D. I. Assessing metal contamination and speciation in sewage sludge: implications for soil application and environmental risk. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, Dordrecht, v. 22, n. 4, p. 1037–1058, 1 dez. 2023.

FERRAZ, M. S. O. **Ecologia da paisagem e controle biológico conservativo na cultura da cana-de-açúcar**. 2022. 184 f. Tese (Doutorado em Entomologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

MATOS FILHO, C. H. A.; SOUSA, R. S. DE; ALCÂNTARA NETO, F.; SILVA, V. B.; DINIZ, Y. B.; CARVALHO JÚNIOR, G. M.; NASCIMENTO, F. N. DO; SILVA, R. R. C.; SOUSA, G. L. Avaliação de clones de cana-de-açúcar para produção de biomassa de qualidade na região canavieira do Piauí. **Peer Review**, Washington, DC, v. 5, n. 4, p. 188–204, 2 abr. 2023.

FONTES FILHO, A. J. O. **Eficiência técnica e ambiental das empresas do setor sucroenergético**: uma abordagem utilizando Análise Envoltória de Dados (DEA). 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 26 jan. 2023.

VASCONCELOS FILHO, I. C. **Fertilizantes Organominerais em interação com microrganismos e a produção de biomassa da cana-de-açúcar**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agônômica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1 dez. 2023.

FRANCO, M. L. G. **Elementos críticos em projetos de transformação digital: estudo com empresas do setor sucroenergético brasileiro**. 2022. Tese (Doutorado em Administração de Empresas) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 10 ago. 2022.

FREIRE, F. J.; SILVA, F. C. DA; CARVALHO, M. L. DE; VENEGAS, V. H. A. Modelagem para otimização da calagem e adubação na cultura de cana-de-açúcar. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, Piracicaba, v. 12, n. 2, p. 09–29, 28 dez. 2022. ISSN 2236-9171.

GARCIA, J. C.; MENDES, M. B. Fontes de fósforo mineral e organomineral no estado nutricional e no crescimento inicial da cana-de-açúcar / Sources of mineral and organomineral phosphate in the nutrition status and initial growth of sugarcane. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 5, n. 2, p. 2003–2013, 12 maio 2022.

GŁĄB, T.; ŻABIŃSKI, A.; SADOWSKA, U.; GONDEK, K.; KOPEĆ, M.; MIERZWA-HERSZTEK, M.; TABOR, S.; STANEK-TARKOWSKA, J. Fertilization effects of compost produced from maize, sewage sludge and biochar on soil water retention and chemical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 197, p. 104493, 1 mar. 2020.

GOMES, T. C. DE A.; MELO, P. L. A.; SANTOS, T. A.; PEREIRA, K. T. O.; JÚNIOR, J. C. DA C.; SANTOS, T. C.; ARAÚJO, J. L. P. **Comunicado Técnico 229: Recomendações para o uso de composto orgânico adicionado de vinhaça em cultivo de cana-de-açúcar**. Aracaju: Embrapa, 2019.

GUERRA, P. J. C. A cana-de-açúcar e a sustentabilidade: desafios para a readequação do setor sucroenergético nos estados das antigas capitanias do norte. **Revista de Estudos Interdisciplinares**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 5, p. 11, 22 fev. 2023a.

GUERRA, P. J. C. A cana-de-açúcar e a sustentabilidade: desafios para a readequação do setor sucroenergético nos estados das antigas capitanias do norte. **Revista De Estudos Interdisciplinares**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 5, 22 fev. 2023b.

GUERRA, R. C.; ANGELIS, D. F. D. Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 72, n. 1, p. 87–91, 1 abr. 2021.

GUIMARÃES, G.; LANA, R. DE P.; REI, R. DE S.; VELOSO, C. M.; SOUSA, M. R. DE M.; RODRIGUES, R. C.; CAMPOS, S. DE A. Produção de cana-de-açúcar adubada com cama de frango. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 17, p. 617–625, dez. 2016.

HERZFELD, T.; HEINKE, J.; ROLINSKI, S.; MÜLLER, C. Soil organic carbon dynamics from agricultural management practices under climate change. **Earth System Dynamics**, Goettingen, v. 12, n. 4, p. 1037–1055, 22 out. 2021.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; YIN CHAN, K.; NELSON, P. F. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of

cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). **Chemosphere**, Oxford, v. 78, n. 9, p. 1167–1171, 1 fev. 2010.

HU, L.; HUANG, R.; DENG, H.; LI, K.; PENG, J.; ZHOU, L.; OU, H. Effects of Different Intercropping Methods on Soil Organic Carbon and Aggregate Stability in Sugarcane Field. **Polish Journal of Environmental Studies**, Olsztyn, v. 31, n. 4, p. 3587–3596, 12 jul. 2022.

HUNTER, M. C.; SMITH, R. G.; SCHIPANSKI, M. E.; ATWOOD, L. W.; MORTENSEN, D. A. Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. **BioScience**, Cary, v. 67, n. 4, p. 386–391, 1 abr. 2017.

ICLEI. **Guia para Gestores Públicos: sistemas alimentares circulares na américa latina**. Bonn: ICLEI, 2023. Disponível em: <https://circulars.iclei.org/>. Acesso em: 6 abr. 2024.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank Group, p. 295, 2021.

KEHERWALD, G. U. **Biochar de lodo de esgoto como fonte de fósforo para o milho: uma abordagem inicial**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

KNOPIK, M. A. **Valoração do lodo de esgoto como insumo agrícola: estudo de caso na região noroeste do estado do Paraná - BR**. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Limpas) - Universidade Cesumar – UNICESUMAR, Maringá, 2020.

KOHLER, T. W.; MASCARENHAS, L. S.; LEMÕES, L. S.; HÄRTER, A.; CERQUEIRA, V. S.; SILVA, S. D. DOS A. Substratos a base de compostos orgânicos destinados à produção de mudas de cana-de-açúcar via minitoletes. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 15, n. 2, 2022.

LEAL, E. R. P. **Impacto de preparos do solo sobre características agronômicas e das raízes de cana-de-açúcar em sucessão com amendoim em sistema meiosi**. 2022. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Universidade Estadual Paulista, Unesp, Jaboticabal, 13 dez. 2022.

LI, L.; LI, H.; TONG, L.; LV, Y. Sustainable Agriculture Practices: Utilizing Composted Sludge Fertilizer for Improved Crop Yield and Soil Health. **Agronomy**, Basel, v. 14, n. 4, p. 756, abr. 2024.

LIMA, J. R. DE S.; ARAÚJO, M. B. D.; OLIVEIRA, C. L. D.; BARROS, C. T.; AMORIM, A. DA S.; BEZERRA, A. L.; DILL, P. R. J.; MEDEIROS, É. V. D.; HAMMECKER, C.; ANTONINO, A. C. D.; LEITE, M. C. DE B. S. Biochar de Lodo de Esgoto Aumenta a Produção e Eficiência no Uso de Água da Alface. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 13, n. 4, p. 1720–1729, jul. 2020.

LOPES, P. A. P.; PEGORARO, R. F.; KONDO, M. K.; SANTOS, S. R. DOS; FERNANDES, L. A. Produção e qualidade microbiológica de cultivares de feijão-caupi após adubação residual com lodo de esgoto. **Revista Caatinga**, Mossoro, v. 33, n. 01, p. 21–30, 14 fev. 2020.

MADEIRO, Y.; FARIAS, G.; SILVA, A.; CABRAL, N. R.; ALMEIDA, G. Estimativa econômica no uso do lodo de esgoto para fins agrícolas. *In*: XIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 13., 2022. Teresina. **Anais** [...]. Piratininga: IBEAS, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.13.22.VII-031>. Acesso em: 1 jul. 2024.

MAFRA, E. T. Fertilizantes: o que são e de onde vêm?. **Forbes**, São Paulo, 11. mar. 2022. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2022/03/fertilizantes-o-que-sao-e-de-onde-vem/>. Acesso em: 1 jul. 2024.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F. Dos; REBOITA, M. S. Classificação climática de köppen e de thornthwaite para minas gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, 2018.

MENDES, T. J.; SIQUEIRA, D. S.; FIGUEIREDO, E. B. De; BORDONAL, R. De O.; MOITINHO, M. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA JUNIOR, N. Soil carbon stock estimations: methods and a case study of the Maranhão State, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, v. 23, n. 11, p. 16410–16427, 1 nov. 2021.

MIRZAEI, M.; ANARI, M. G.; CHERUBIN, M. R.; SARONJIC, N.; MOUSAVI, S. M. N.; ROOIJEN, A.; ZAMAN, M.; CABALLERO-CALVO, A. Crop Residues Stimulate Yield-Scaled Greenhouse Gas Emissions In Maize-Wheat Cropping Rotation In A Semi-Arid Climate. **Geography, Environment, Sustainability**, Moscow, v. 16, n. 4, p. 125–132, 12 jan. 2024.

MONTEZUMA, M. G. **Geração de metano a partir da codigestão de lixo de aterro sanitário e lodo de esgoto**. 2023. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2023

MORAES, E. R. De; SILVA, R. V. Da; SILVA, V. L. N. Da; PEIXOTO, J. V. M.; LIMA, B. V. De; MARTINS, G. A. Melhoria das características tecnológicas da cana-de-açúcar com adição de adubação organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante. **Contribuciones a las ciencias sociales**, Malaga, v. 16, n. 8, p. 11956-11974, 20 ago. 2023.

MOREIRA, R. S.; LENSE, G. H. E.; FÁVERO, L. F.; OLIVEIRA JUNIOR, B. M. De; MINCATO, R. L. Estado nutricional e parâmetros fisiológicos de milho cultivado com lodo de esgoto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 44, 9 abr. 2020.

MOSAIC. **Em canaviais, fertilizante eleva colheita em 10 toneladas por hectare**. São Paulo: Mosaic, 2022. Disponível em: <https://mosaicco.com.br/Article/https%3A%2F%2Fmosaicco.com.br%2FArticle%2FE%2Fm%252520canaviais%25252C%252520fertilizante%252520eleva%252520colheita%252520em%25252010%252520toneladas%252520por%252520hectare%252520em%252520sao%252520paulo%2525202022>

252520em%25252010%252520toneladas%252520por%252520hectare. Acesso em: 1 ago. 2024.

NASCIMENTO, A. L.; SOUZA, A. J. De; OLIVEIRA, F. C.; COSCIONE, A. R.; VIANA, D. G.; REGITANO, J. B. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 258, p. 120746, 10 jun. 2020.

NITSCH, M. O programa de biocombustíveis Proálcool no contexto da estratégia energética brasileira. **Brazilian Journal of Political Economy**, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 274–299, 3 nov. 2023.

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU-JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 114, p. 168–177, 15 jan. 2013.

NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, L. R.; MELO, W. J. DE; FONSECA, I. M.; MELO, G. M. P. DE; MELO, V. P. DE; MARQUES, M. O. Cádmiu, cromo, chumbo e zinco em plantas de milho e em latossolo após nove aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2195–2207, out. 2008.

NOGUEIRA, T. A. R.; OMIR MARQUES, M.; ALMEIDA MUÇOUÇA, F.; MACHADO FONSECA, I. Cotton plants cultivated in soil amended with lime, sewage sludge and cadmium. **Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal**, Heidelberg, v. 7, n. 1, p. 74–87, 2007.

OGINO, C. M.; GASQUES, J. G. Fertilizantes: dependência externa e impacto produtivo. In: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (org.). **Agropecuária Brasileira: evolução, resiliência, e oportunidades**. Rio de Janeiro: IPEA, 2023. Cap. 5, p. 97-121.

OLIVA, F. A.; JACOMETTI, S. Análise de variedades de cana-de-açúcar: um estudo sobre a competitividade. **Revista Alomorfia**, Presidente Prudente, v. 7, n. 4, p. 800–809, 2023.

OLIVEIRA, G. S. De *et al.* Common Bean Productivity and Micronutrients in the Soil–Plant System under Residual Applications of Composted Sewage Sludge. **Plants**, Basel, v. 12, n. 11, p. 2153, jan. 2023.

OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M. De; BOLONHEZI, D.; TOTTI, M. C. V.; MORAES, M. T. De; LOVERA, L. H.; LIMA, E. De S.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, C. F. Tillage systems impact on soil physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-sprouted seedlings. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 223, p. 105460, 1 set. 2022.

OLIVEIRA, M. W. De; MACÊDO, G. A. R.; MARTINS, J. A.; OLIVEIRA, A. B. De; SILVA, V. S. G. Mineral Nutrition and Fertilization of Sugarcane. In OLIVEIRA, A. De. **Sugarcane: Technology and Research**. London: IntechOpen, 2017.

OLIVEIRA, R. A. De; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. De S. **Liberção nacional de variedades RB de cana-de-açúcar**. Cutitiba: RIDESA, 2021.

OWEN, D.; DAVIS, A. P.; AYDILEK, A. H. Compost for Permanent Vegetation Establishment and Erosion Control along Highway Embankments. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 147, n. 8, p. 04021031, 1 ago. 2021.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F. De; PICKLER, A. De C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. Da C. Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 147–158, 2010.

PICARIELLO, E.; PUCCI, L.; CAROTENUTO, M.; LIBRALATO, G.; LOFRANO, G.; BALDANTONI, D. Compost and Sewage Sludge for the Improvement of Soil Chemical and Biological Quality of Mediterranean Agroecosystems. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 1, p. 26, jan. 2021.

PRATES, A. R.; COSCIONE, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; MIRANDA, B. G.; ARF, O.; ABREU JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; SARTORI, M. M. P.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Enhances Soybean Production and Agronomic Performance in Naturally Infertile Soils (Cerrado Region, Brazil). **Agronomy Journal**, Madison, v. 10, n. 11, p. 1677, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1677>. Acesso em: 1 ago. 2024.

PRATES, A. R.; KAWAKAMI, K. C.; COSCIONE, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on an Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1246, 2022a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/8/1246>. Acesso em: 1 ago. 2024.

PRATES, A. R.; KAWAKAMI, K. C.; COSCIONE, A. R.; FILHO, M. C. M. T.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on an Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1246, 2022b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/8/1246>. Acesso em: 1 ago. 2024.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 1 ago. 2024.

RAIZER, A. J.; CARVALHO, M. L. De; CAMARGO, A. C.; MARCHIORI, L. F. S.; ABREU JUNIOR, C. H.; CHRISTOFOLETTI, D. Aplicação de Potássio em Cana-de-Açúcar Energia e Sacarina: Efeito de Doses e Interação Com Micronutrientes e Gesso. In: **Mostra de Estagiários e Bolsistas da Embrapa Agricultura Digital**, 1., Campinas: Embrapa, 2022. p.17-27.

RAMOS, R. Da S. **Seleção de famílias e clones de Saccharum spp. para obtenção de cana energia**. 2021. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos Climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 17, 2015.

REIS, L. F. Dos; SANTOS, R. Dos; GOMES, L. de O. Biomassa: Análise da utilização do bagaço-cana-de-açúcar na geração de energia. **Congresso Tecnológico da Fatec Mococa**, Mococa, v. 7, n. 1, 31 ago. 2023.

RODRIGUES, L.; RODRIGUES, L. Performance financeira do setor sucroenergético brasileiro de 2001 a 2019. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 117, 8 jul. 2022.

ROLIM, G. de S.; CAMARGO, M. B. P. de; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. de. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n.4, p. 711–720, 2007.

ROSSETTO, R.; RAMOS, N. P.; PIRES, R. C. de M.; XAVIER, M. A.; CANTARELLA, H.; LANDELL, M. G. de A. Sustainability in Sugarcane Supply Chain in Brazil: Issues and Way Forward. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 24, n. 3, p. 941–966, 1 jun. 2022.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, D. A. **Adubação orgânica**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 2.

RUMPEL, C.; CHABBI, A. Managing Soil Organic Carbon for Mitigating Climate Change and Increasing Food Security. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1553, ago. 2021.

SIEBIELEC, G.; SIEBIELEC, S.; LIPSKI, D. Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 187, p. 372–379, 20 jun. 2018.

SILVA, G. DA; PRADO, R. Estado nutricional da cana-de-açúcar em função da aplicação de nitrogênio e silício. **Acta Tecnológica**, São Luís, v. 15, n. 1, p. 27, 19 mar. 2021.

SILVA, G. M. L. da. **Adubação potássica sob diferentes densidades de plantio na cana-de-açúcar**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia, PB, 21 abr. 2020.

SILVA, J. H. B.; NASCIMENTO, M. A.; SILVA, A. V.; PEREIRA NETO, F.; ARAÚJO, J. R. E. S.; SILVA, J. M.; SILVA, A. J.; MIELEZRSKI, F. Brotação inicial, teor de sólidos solúveis e índice de maturação da cana-de-açúcar submetida à adubação com torta de filtro enriquecida / Initial breasting, soluble solids content and sugar cane maturation index submitted to fertilization with enriched filter pie. **Brazilian**

Journal of Development, São José dos Pinhais, v. 7, n. 3, p. 32575–32592, 30 mar. 2021.

SILVA, L. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **CATENA**, Amsterdam, v. 185, p. 104258, 1 fev. 2020.

SILVA, M. B. *et al.* 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**, Lausanne, v. 14, 20 out. 2023.

SILVA, M.; MARTINAZZO, R.; SILVA, S. D. A.; BAMBERG, A. L.; STUMPF, L.; FERMINO, M. H.; KOHLER, T. W.; MATOSO, E. S.; VALGAS, R. A. Innovative substrates for sugarcane seedling production: Sewage sludges and rice husk ash in a waste-to-product strategy. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 157, p. 112812, 1 dez. 2020.

SILVA, W. R. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; SOUZA, A. A. B.; FRACETTO, G. G. M.; XIMENES, D. H. S. V. Effects of Sewage Sludge Stabilization Processes on Soil Fertility, Mineral Composition, and Grain Yield of Maize in Successive Cropping. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 21, n. 2, p. 1076–1088, 1 jun. 2021.

SILVA, R. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N. do; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Application Reduces Mineral Fertilization Requirements and Improves Soil Fertility in Sugarcane Seedling Nurseries. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, p. 4684, 2022a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4684>.

SILVA, R. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N. do; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; FILHO, M. C. M. T.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Application Reduces Mineral Fertilization Requirements and Improves Soil Fertility in Sugarcane Seedling Nurseries. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, p. 4684, 2022b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4684>.

SILVA, W. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; SOUZA, A. A. B.; FRACETTO, G. G. M.; XIMENES, D. H. S. V. Effects of Sewage Sludge Stabilization Processes on Soil Fertility, Mineral Composition, and Grain Yield of Maize in Successive Cropping. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 21, n. 2, p. 1076–1088, 1 jun. 2021.

SILVEIRA, E. O. **Tratamento de efluentes urbanos e recuperação de energia através de sistema integrado composto por reator anaeróbio, microalgas e wetland construído de fluxo vertical**. 2021. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SOUSA, R. T. X. de. **Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar**. 2014. 87 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2014.6>

SOUZA, A. A. B.; RAMOS DA SILVA, W.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; SILVA, Y. J. A. B.; BIONDI, C. M. Residual effects of alkalized sewage sludge application on soil quality and sugarcane yield. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxfordshire, v. 69, n. 10, p. 1705–1717, 24 ago. 2023.

SOUZA, A. A. B.; SILVA, W. R.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; SILVA, Y. J. A. B. da; BIONDI, C. M. Residual effects of alkalized sewage sludge application on soil quality and sugarcane yield. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxfordshire, v. 69, n. 10, p. 1–13, 1 ago. 2022.

SOUZA, M. T.; FERREIRA, S. R.; MENEZES, F. G.; RIBEIRO, L. S.; SOUSA, I. M.; PEIXOTO, J. V. M.; SILVA, R. V. da; MORAES, E. R. Altura de planta e diâmetro de colmo em cana-de-açúcar de segundo corte fertilizada com organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante / Height of plant and thermal diameter in second cut sugar fertilized with organomineral of sewage sludge and bioestimulant. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 1, p. 1988–1994, 14 jan. 2020.

SUGURBEKOVA, G.; NAGYZBEKKYZY, E.; SARSENOVA, A.; DANLYBAYEVA, G.; ANUARBEKOVA, S.; KUDAIBERGENOVA, R.; FROCHOT, C.; ACHERAR, S.; ZHATKANBAYEV, Y.; MOLDAGULOVA, N. Sewage Sludge Management and Application in the Form of Sustainable Fertilizer. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 7, p. 6112, jan. 2023.

TENELLI, S.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; CARVALHO, J. L. N. Multilocation changes in soil carbon stocks from sugarcane straw removal for bioenergy production in Brazil. **GCB Bioenergy**, West Sussex, v. 13, n. 7, p. 1099–1111, 2021.

TOFFEY, W.; BROWN, S. Biosolids and ecosystem services: Making the connection explicit. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, Amsterdam, v. 14, p. 51–55, 1 abr. 2020. Environmental Pollution: Biosolids

TOLENTINO, G. **Otimização multiobjetivo para o planejamento integrado do cultivo da cana-de-açúcar e da cana-energia visando a produção de sacarose e fibra**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita”, Bauru, 30 abr. 2021.

VIANA, A. R. S. **Produção de grão-de-bico adubado com fertilizantes organominerais de lodo de esgoto**. 2022. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Minas Gerais, ICA Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, 29 set. 2022.

VIDAL, M. D. F. Açúcar: cenário mundial e situação de produção no brasil e no nordeste brasileiro. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 6, n. 162, p. 10, 2021.

VÍTKOVÁ, M.; ZARZSEVSZKIJ, S.; ŠILLEROVÁ, H.; KARLOVA, A.; ŠIMEK, P.; WIMMEROVÁ, L.; MARTINCOVÁ, M.; URBÁNEK, B.; KOMÁREK, M. Sustainable use of composted sewage sludge: Metal(loid) leaching behaviour and material suitability for application on degraded soils. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 929, p. 172588, 15 jun. 2024.

YUSUF, H. C. M.; JUNIOR, O. B. P. Utilização Sustentável de Lodo de ETA na Confeção de Tijolos Maciços. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, v. 27, n. 4, p. 419–422, 19 dez. 2023.

ZABOTTO, A. R. **Crescimento inicial e produção de óleo essencial de *Corymbia citriodora* (Hook.) em solo suplementado com lodo de esgoto e duas fontes de potássio**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Botucatu, 2020.

2 FERTILIDADE DE SOLO TROPICAL CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR E REDUÇÃO NO USO DE FERTILIZANTES MINERAIS EM RESPOSTA À ASSOCIAÇÃO COM FERTILIZANTE ORGÂNICO A BASE DE LODO DE ESGOTO¹

RESUMO

A cana-de-açúcar demanda quantidades consideráveis de nutrientes para alcançar níveis produtivos satisfatórios. Nesse sentido, a adubação mineral se torna crucial, em especial, em solos de baixa fertilidade. Porém, essa prática acarreta elevação nos custos de produção. Uma estratégia para reduzir tais custos e promover a sustentabilidade no setor sucroenergético consiste em combinar o uso de fertilizantes minerais com fontes orgânicas, como o composto de lodo de esgoto (CLE). Todavia, ainda faltam pesquisas para validar a melhor dose desses fertilizantes e seus benefícios na qualidade química de solos cultivados com cana. Para tal, elaboramos o presente estudo com o objetivo de avaliar as alterações nas propriedades químicas do solo (pH, MO, H+Al, SB, CTC e V) e nos teores de macro (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) no solo, nas camadas 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade, após a aplicação do CLE associado ou não a adubação mineral convencional (AMC) no cultivo de cana-de-açúcar (1ª e 2ª soca). Os tratamentos testados no 1º ano foram: T1 – controle absoluto; T2: 100% da AMC NPK (20–00–20); doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses (t ha⁻¹, base úmida) de CLE + AMC com NPK (kg ha⁻¹) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; e T11: 7,5 + 100%. No 2º ano, para avaliar o efeito residual do CLE, não foi aplicado as doses de CLE, porém, apenas os fertilizantes minerais foram fornecidos nas mesmas proporções para cada tratamento. A reciclagem do CLE como fertilizante orgânico na cultura da cana-de-açúcar contribui para a melhoria da fertilidade do solo incrementando os atributos MO, SB, CTC e V e os teores de P, K, Ca, Mg, B, Cu e Zn na camada superficial e subsuperficial tanto na 1ª soca quanto na 2ª soca. Nossos resultados demonstraram ser possível reduzir a adubação mineral (NPK) no cultivo da cana em 50% quando houver associação à aplicação de no mínimo 5,0 t ha⁻¹ de CLE (base úmida).

¹ Esse capítulo foi publicado como artigo na Revista Land

Palavras-chave: economia circular; fertilizante orgânico; *Saccharum spp*; sustentabilidade.

TREATING TROPICAL SOILS WITH COMPOSTED SEWAGE SLUDGE REDUCES THE MINERAL FERTILIZER REQUIREMENTS IN SUGARCANE PRODUCTION

ABSTRACT

Sugarcane requires considerable amounts of nutrients to achieve satisfactory yields. Conventional mineral fertilization (CMF) is a common practice in infertile sugarcane cultivated tropical soils. Conversely, CMF increases production costs and environmental concerns if poorly managed. Combining CMF with organic fertilizers such as composted sewage sludge (CSS) could be a sustainable strategy. We aim to evaluate changes in soil chemical properties (pH, OM, H+Al, SB, CEC, and BS), macronutrient (P, K, Ca, Mg, and S), and micronutrient (B, Cu, Fe, Mn, and Zn) concentrations in the soil surface (0.00–0.25 m) and subsurface (0.25–0.50 m) horizons, after CSS application with or without CMF in sugarcane cultivation (first and second ratoon cane). The treatments tested in the first ratoon were: T1: control; T2: 100% of CMF+ NPK (20–00–20); T3, T4, and T5: 2.5, 5.0, and 7.5 t ha⁻¹ of CSS; T6, T7, and T8: 2.5, 5.0, and 7.5 Mg ha⁻¹ of CSS + 50% CMF; T9, T10, and T11: 2.5, 5.0, and 7.5 t ha⁻¹ of CSS + 100 % CMF. In the second ratoon, the CSS residual effect was evaluated. Use of CSS in sugarcane improved soil fertility by increasing OM, SB, CEC, BS, and all nutrient concentrations in both investigated horizons and for the first and second cane crops. Our results showed that mineral fertilization in cane cultivation can be reduced by 50% When 5.0 Mg ha⁻¹ CSS is applied.

Keywords: *Saccharum officinarum* L.; by-products reuse; circular economy; soil fertility; tropical areas.

2.1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) desempenha um papel crucial no setor sucroenergético brasileiro, sendo amplamente valorizada devido à sua versatilidade na produção de diversos produtos, como açúcar, etanol (hidratado e anidro), caldo de cana, rapadura e energia (Dias e Santos, 2023). Além disso, seus subprodutos, como a vinhaça e o bagaço, são aproveitados de forma sustentável na adubação e na geração de energia, respectivamente. Com uma área cultivada de 8,2

milhões de hectares e uma expectativa de produção de 610,1 milhões de toneladas, o Brasil tem como meta alcançar uma produtividade média de 73,6 t ha⁻¹ para a safra 2022/23. A região sudeste do país se destaca como a maior produtora de cana-de-açúcar, sendo estimada uma produção de 387,7 milhões de toneladas, sendo que o Estado de São Paulo é responsável por 51% da produção nacional (CONAB, 2023; Dias e Santos, 2023; Filho *et al.*, 2023; Junior, 2023).

A produção de cana-de-açúcar tem desempenhado um papel significativo na economia brasileira há mais de dois séculos, com o setor sucroenergético contribuindo com mais de 2% do Produto Interno Bruto (PIB). Além do mais o cultivo dessa cultura apresenta diversas vantagens adicionais, como a recuperação de áreas degradadas, a manutenção do estoque de carbono no solo, a produção de fontes de bioenergia, a ciclagem de nutrientes e a geração de empregos, o que resulta em efeitos positivos no contexto social (Cherubin *et al.*, 2021; IBGE, 2022; Bastos *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023). Destaca-se a adubação como um fator primordial para alcançar melhores resultados produtivos tanto na fase de crescimento inicial da cana-de-açúcar (cana planta) quanto na fase subsequente de rebrota (cana soca). Por meio de uma adubação adequada, é possível observar incremento na altura e diâmetro da planta, além de contribuir significativamente para as variáveis tecnológicas que influenciam na qualidade do açúcar, tais como graus brix, teor de sacarose (POL), açúcar total recuperável (ATR) e a produtividade em toneladas de açúcar por hectare (Pang *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Dias e Santos, 2023; McCray e Rice 2023).

A recomendação da adubação mineral de plantio da cana-de-açúcar está relacionada a duas variáveis: produtividade esperada e análise do solo, sendo que para nitrogênio (N) considera-se apenas a primeira variável e o histórico de cultivos da área agrícola. Se a produtividade esperada for acima de 100 t ha⁻¹, deve-se aplicar 30 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 150 kg ha⁻¹ de K₂O. Se for constatado baixo teor de B, Cu e Zn no solo é recomendado a aplicação de 2,4 e 5,0 kg ha⁻¹ de nutriente, respectivamente. A adubação mineral para cana soca também está relacionada as variáveis supracitadas, porém se aplica comumente N, K, além de B e Zn. Se a produtividade esperada for acima de 100 t ha⁻¹, deve-se aplicar 120 kg ha⁻¹ de N e 160 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação orgânica é praticada na cultura da cana-de-açúcar e, recomenda-se a utilização de 10 a 30 t ha⁻¹ no sulco de plantio ou próximo a linha da soqueira (Cantarella *et al.*, 2022).

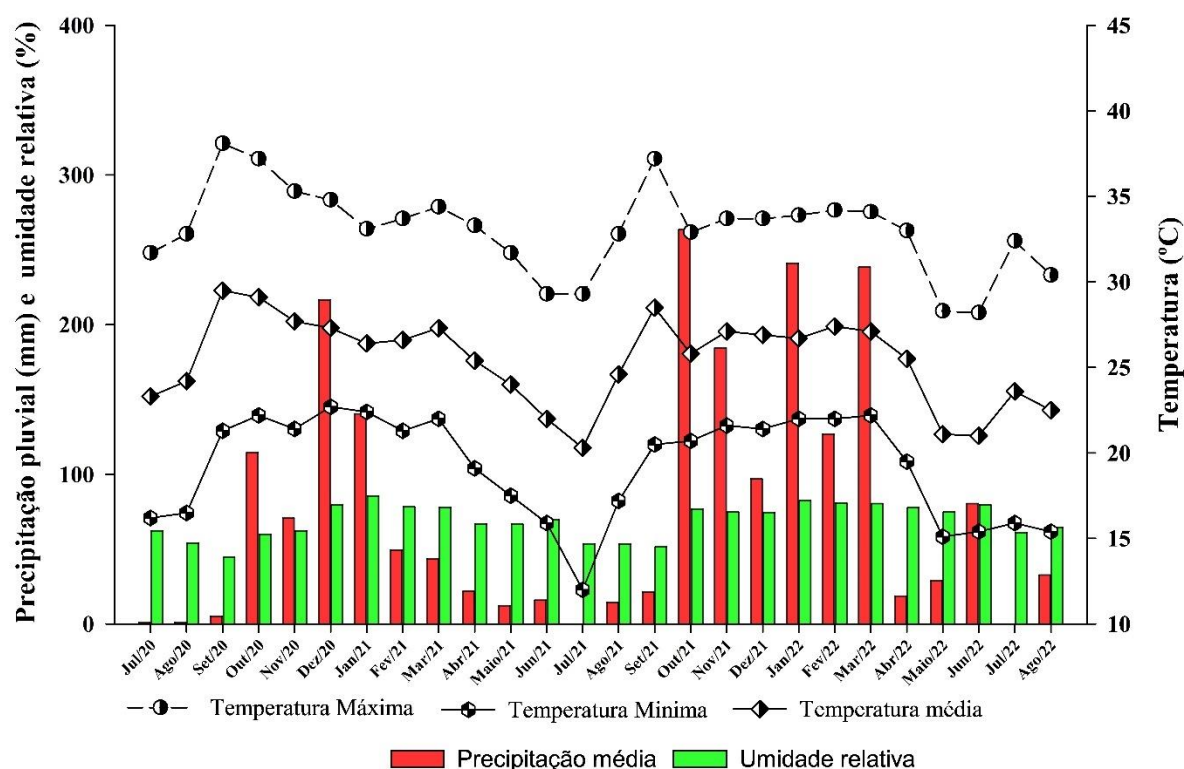
Entretanto a adubação mineral utilizada na produção de cana-de-açúcar no Brasil é em grande parte proveniente de importação, o que eleva os custos de produção. Nesse contexto, é crucial buscar alternativas de adubos que forneçam as mesmas concentrações de nutrientes, permitindo a redução dos custos de aquisição. Além disso, a adubação alternativa pode garantir a sustentabilidade da cadeia produtiva das principais culturas (Vasconcellos *et al.*, 2019; Rosa *et al.*, 2020; Carpanez *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2022).

Uma opção para isso é o lodo de esgoto (LE), que é o resultado da gestão do esgoto urbano aplicado nas estações de tratamento (ETE's). Logo após o tratamento, o LE é reciclado mediante o processo de compostagem. Vale a pena mencionar que, essa matéria prima não é perigosa e inerte, possui cerca de 60 a 70% de matéria orgânica (MO) na base seca. Todo o processo de compostagem é regido por normativas federais do setor agrícola, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa SDA Nº 61 de 08/07/2020 e do meio ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) pela Resolução CONAMA Nº 498 de 19/08/2020. Desse modo, o composto de lodo de esgoto (CLE) pode ser utilizado como adubação orgânica nas grandes culturas, como por exemplo a cana-de-açúcar (Brasil, 2020a; Brasil, 2020b; Tera, 2021).

O CLE pode ser considerado uma fonte alternativa de adubação orgânica, uma vez que fornece macro e micronutrientes e atua como condicionador do solo. Diversas pesquisas têm demonstrado benefícios nos atributos físicos e biológicos do solo, como melhoria da estrutura, maior capacidade de retenção de água e aumento da atividade microbiana. Ao mesmo tempo, o uso desse composto orgânico, isoladamente ou em combinação com adubação mineral convencional (AMC), tem sido associado ao aumento da produtividade em várias culturas agrícolas, espécies florestais e ornamentais. Desse modo, a compostagem desse material contribui de forma significativa para a gestão de resíduos urbanos, reduzindo a poluição e o impacto ambiental (Prates *et al.*, 2020; Dar *et al.*, 2023; Feng *et al.*, 2023; Kazimierowicz e Dębowski, 2023; Singh *et al.*, 2023; Vinciguerra *et al.*, 2023).

No presente estudo, buscou-se validar a hipótese que a aplicação do CLE associado ou não à aplicação de fertilizantes minerais, contribui para melhorar a fertilidade do solo. Assim, objetivou-se monitorar as alterações dos atributos químicos do solo após a aplicação do CLE associado ou não à AMC com NPK, na primeira soca

Figura 2 – Médias mensais da precipitação pluvial (mm), da umidade relativa do ar (%) e da temperatura (°C) máxima, média e mínima registradas durante o cultivo da cana-de-açúcar. Dados coletados da estação climática da Faculdade de Engenharia da Unesp, Ilha Solteira



Fonte: Do próprio autor

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico, textura arenosa (Santos *et al.*, 2018). A implantação foi realizada em uma área comercial com a cultura de cana-de-açúcar. Com o intuito de realizar a caracterização física e química do solo, amostras do solo foram coletadas antes da instalação do experimento nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos físicos^a e químicos^b das amostras de solo coletadas na área experimental nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade (média ± desvio padrão, $n = 3$)

Atributos	Unidade	Profundidade (m)					
		0,00–0,25			0,25–0,50		
pH (CaCl ₂)	-	5,2	±	0,1	5,1	±	0,1
Matéria orgânica	g dm ⁻³	12,7	±	0,5	12,0	±	0,8
Fósforo	mg dm ⁻³	1,3	±	0,5	2,7	±	1,7
Potássio	mmol _c dm ⁻³	1,2	±	0,1	1,2	±	0,1
Cálcio	mmol _c dm ⁻³	15,7	±	5,2	17,3	±	5,4
Magnésio	mmol _c dm ⁻³	8,7	±	0,4	10,7	±	0,4
Alumínio	mmol _c dm ⁻³	0,7	±	0,9	1,7	±	1,2
H+Al	mmol _c dm ⁻³	16,7	±	2,3	16,0	±	1,4
SB	mmol _c dm ⁻³	25,5	±	5,5	29,2	±	5,7
S-SO ₄	mg dm ⁻³	2,0	±	0,0	2,3	±	0,4
CTC	mmol _c dm ⁻³	42,2	±	4,2	45,2	±	4,9
V	%	60,0	±	7,8	64,0	±	5,7
<i>m</i>	%	3,0	±	4,2	5,3	±	4,5
Boro	mg dm ⁻³	0,2	±	0,0	0,1	±	0,0
Cobre	mg dm ⁻³	1,1	±	0,1	1,3	±	0,1
Ferro	mg dm ⁻³	13,3	±	1,7	16,0	±	2,2
Manganês	mg dm ⁻³	12,4	±	3,0	7,9	±	1,8
Zinco	mg dm ⁻³	0,6	±	0,0	0,6	±	0,1
Argila	g kg ⁻¹				134,0	±	23,0
Silte	g kg ⁻¹				87,0	±	16,0
Areia	g kg ⁻¹				779,0	±	39,0
Textura	-				Arenosa		

Fonte: Do próprio autor.

^aTeixeira et al. (2017). ^bRaij et al. (2001). MO: Matéria orgânica do solo. CTC: Capacidade de troca catiônica. SB: Soma de bases. V: Saturação por bases

2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com 11 tratamentos e quatro repetições, totalizando 44 unidades experimentais. Os tratamentos utilizados no primeiro ano do experimento (1^a soca - safra 2020/2021), consistiram em diferentes aplicações de doses de CLE (base úmida) e de adubo mineral NPK (formulação 20–00–20). No segundo ano (2^a soca - 2021/2022), o experimento foi conduzido novamente no mesmo local, preservando-se as mesmas localizações das parcelas utilizadas no ano anterior. No entanto, neste ano, não foram

aplicadas doses de CLE. Em vez disso, foram aplicadas apenas adubações de cobertura mineral NPK (formulação: 20-00-20). O intuito dessa abordagem foi avaliar o efeito residual da aplicação das doses de CLE realizada no primeiro ano do experimento. Considerou-se a proporção de 1,0 kg ha⁻¹ de N e K₂O por tonelada de cana, metodologia utilizada na produção de cana soca comercial na empresa que sediou a instalação do experimento. Os tratamentos utilizados nos dois anos estão detalhados na tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos tratamentos estudados na presente pesquisa

Tratamentos	2019/20	2020/21	2021/22
	Cana planta	1ª Soca	2ª Soca
T1	CLE 0,0 t ha ⁻¹ + AMC 0%	CLE 0,0 t ha ⁻¹ + AMC 0%	CLE 0,0 t ha ⁻¹ + AMC 0%
T2	100% AMC ¹	100% AMC ²	100% AMC ³
T3	CLE 2,5 ha ⁻¹	CLE 2,5 ha ⁻¹	-
T4	CLE 5,0 ha ⁻¹	CLE 5,0 ha ⁻¹	-
T5	CLE 7,5 ha ⁻¹	CLE 7,5 ha ⁻¹	-
T6	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	AMC 50%
T7	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 50%	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 50%	AMC 50%
T8	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	AMC 50%
T9	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	AMC 100%
T10	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 100%	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 100%	AMC 100%
T11	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	AMC 100%

Fonte: Do próprio autor.

¹ AMC NPK (06-30-24), sendo: 33 kg ha⁻¹ de N, 165 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 132 kg ha⁻¹ de K₂O. ² AMC NPK (20-00-20), sendo: 90 kg ha⁻¹ de N e 90 kg ha⁻¹ de K₂O. ³ AMC NPK (20-00-20), sendo: 75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O. CLE: Composto de lodo de esgoto. AMC: Adubação mineral convencional.

2.2.3 Caracterização do composto de lodo de esgoto

O CLE foi fornecido pela empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP, Brasil. Trata-se de um fertilizante orgânico composto Classe B já registrado junto ao MAPA (Brasil, 2020a). O CLE é produzido a partir da compostagem de resíduos orgânicos urbanos diversos, como lodo de esgoto sanitário, resíduos orgânicos urbanos e agroindustriais tais como bagaços, cascas de frutas e legumes provenientes do processamento de alimentos, cama de aviário e cavaco de madeira. Na obtenção do CLE, os compostos orgânicos sofrem decomposição e estabilização biológica por meio da compostagem termofílica, com temperatura acima dos 60 °C, tornando-o completamente higienizado, posteriormente o produto passa pelo processo de

peneiramento e empilhamento, fase essencial para a maturação do composto num período de aproximadamente duas semanas. Após essa etapa o fertilizante orgânico estará pronto para o uso, o produto possui cerca de 40% de umidade. O composto foi caracterizado seguindo as recomendações preconizadas na Resolução no 375/2006 (Brasil, 2006), sendo considerado apropriado para uso neste estudo conforme a composição química e microbiológica descritas abaixo, segundo a instrução normativa nº 7 MAPA (2020) sendo: pH (CaCl_2) = $7,9 \pm 0,4$; umidade ($60\text{--}65\text{ }^\circ\text{C}$) = $33,9 \pm 1,4\%$; umidade total = $35,1 \pm 1,5\%$; MO = $230,4 \pm 8,3\text{ g kg}^{-1}$; carbono orgânico = $111,1 \pm 14,8\text{ g kg}^{-1}$; CTC = $250,3 \pm 4,6\text{ mmol c dm}^{-3}$; relação carbono/nitrogênio (C/N) = $11,0 \pm 1,7$; N total = $10,5 \pm 1,8\text{ g kg}^{-1}$; P total = $13,2 \pm 3,9\text{ g kg}^{-1}$; S total = $6,2 \pm 0,4\text{ g kg}^{-1}$; Mg = $9,5 \pm 2,3\text{ g kg}^{-1}$; K = $8,0 \pm 1,0\text{ g kg}^{-1}$; Ca = $30,6 \pm 3,4\text{ g kg}^{-1}$; arsênio (As) = $6,4 \pm 2,3\text{ g kg}^{-1}$ (valor permitido: 20 mg kg^{-1}); B = $17,6 \pm 6,0\text{ mg kg}^{-1}$; cádmio (Cd) = $0,9 \pm 0,3\text{ mg kg}^{-1}$ (valor permitido: 3 mg kg^{-1}); Cu = $178,0 \pm 61,9\text{ mg kg}^{-1}$; chumbo (Pb) = $17,8 \pm 10,1\text{ mg kg}^{-1}$ (valor permitido: 150 mg kg^{-1}); cromo (Cr) = $65,7 \pm 46,2\text{ mg kg}^{-1}$; Fe = $18207 \pm 788,1\text{ mg kg}^{-1}$; Mn = $435,0 \pm 208,0\text{ mg kg}^{-1}$; mercúrio (Hg) = $0,3 \pm 0,1\text{ mg kg}^{-1}$ (valor permitido: 1 mg kg^{-1}); Mo = $6,0 \pm 3,4\text{ mg kg}^{-1}$; níquel (Ni) = $30,1 \pm 3,4\text{ mg kg}^{-1}$ (valor permitido: 70 mg kg^{-1}); Zn = $1083 \pm 339,5\text{ mg kg}^{-1}$. Os teores dos elementos encontrados no CLE foram comparados com os valores permissíveis descritos pela Instrução Normativa N° do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2016).

Nas análises microbiológicas, os resultados foram os seguintes: presença de *Salmonella* sp. ausente (NMP/10g); coliformes termotolerantes não detectados (NMP/g); e ovos viáveis de helmintos = 0,1 ovos/g de sólidos totais (ST), estando abaixo do limite permitido de 1 ovo/g de ST.

2.2.4 Desenvolvimento e histórico do experimento

O preparo inicial da área experimental foi realizado em novembro de 2019, época em que foi realizada o manejo das plantas invasoras via dessecação com glifosato na dose de $3,1\text{ kg ha}^{-1}$ do i.a. Com base nos resultados da avaliação da fertilidade do solo (Tabela 1), foi realizada a aplicação de calcário agrícola (PRNT=85) ($0,5\text{ t ha}^{-1}$) de forma mecanizada em área total, objetivando elevar a saturação por bases a 70% e, em seguida, aplicação de $0,7\text{ t ha}^{-1}$ de gesso agrícola de forma mecanizada em área total (Cantarella *et al.*, 2022). Foi realizada uma gradagem pesada, seguida de uma grade intermediária e subsolagem nas profundidades 0,30, 0,25 e 0,45 m, respectivamente, com aplicação de inseticida imidacloprido $1,2\text{ kg ha}^{-1}$

do i.a. para o controle da broca da cana (*Migdolus fryanus*). O CLE e o AMC utilizados em cada tratamento foram aplicados manualmente no sulco no momento do plantio em cada unidade experimental.

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado de maneira semimecanizada, utilizando um total de 14,26 t ha⁻¹ de muda de cana. Utilizou-se como planta-teste a variedade de cana-de-açúcar RB867515, a variedade de cana mais plantada no Brasil, na referida é. Trata-se de uma variedade com bom desenvolvimento vegetativo, alto índice produtivo e alto teor de açúcar (Daros *et al.*, 2010a; Oliveira, Hoffmann e Barbosa, 2021). A profundidade do sulco para a realização do plantio foi de aproximadamente 0,35 m e as mudas foram posicionadas no fundo do sulco com uma proporção de 22 gemas viáveis por metro. Cada parcela experimental compreendeu em seis linhas da cultura de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,50 m entre si e com 10 m de comprimento, totalizando 90 m² por parcela e 3,960 m² de área total. A área útil da parcela para as avaliações foi constituída pelas três linhas centrais, sendo eliminados como bordadura 1,0 m de cada extremidade, totalizando 36 m².

Logo após a colheita da cana planta, em agosto 2020, foi realizada a aplicação de herbicida em pré-emergência com diuron 2,4 kg ha⁻¹ do i.a. e s-metolaclopro 2,2 L ha⁻¹ do i.a. para controlar o banco de sementes das plantas invasoras. Devido ao efeito residual das aplicações de calcário e gesso agrícola realizadas no plantio, não foi necessário reaplicar esses insumos no segundo ano agrícola. A reaplicação desses insumos foi realizada apenas no terceiro ano agrícola, sendo aplicado 0,5 t ha⁻¹ de gesso e calcário agrícola (PRNT 85%) (Cantarella *et al.*, 2022). Aos 60 dias após a colheita (outubro de 2020), foi realizada na 1ª soca a aplicação do CLE e dos fertilizantes minerais. Na 2ª soca (novembro de 2021), aplicou-se apenas os fertilizantes minerais (Tabela 2). O CLE e os fertilizantes minerais foram distribuídos manualmente sobre a superfície do solo, sem incorporação.

Após a colheita da 1ª e 2ª soca, foram realizadas coletas de solo 20 dias após a colheita. As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade. Para tal, foram coletadas aleatoriamente seis subamostras por parcela para compor uma amostra composta. Essas amostras foram coletadas aleatoriamente na área útil de cada parcela com o auxílio de um amostrador mecânico. Na sequência, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com 2,0 mm de abertura de malha, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas em câmara seca até o momento das análises químicas.

2.2.5 Análise dos atributos químicos do solo

Os atributos químicos do solo foram avaliados conforme os protocolos analíticos descritos por (Raij *et al.*, 2001). Os valores de pH foram determinados potenciometricamente em suspensões de terra fina seca ao ar em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ na proporção solo-solução de 1:2,5. A matéria orgânica (MO) foi determinada após oxidação com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em presença de H_2SO_4 e titulação do excesso de dicromato com a solução de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,4 \text{ mol L}^{-1}$. O alumínio trocável (Al^{+3}) foi extraído com $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e depois titulado com NaOH - $0,025 \text{ mol L}^{-1}$. O cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) trocável extraídos por resina trocadora de íons e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica (EAA, Modelo Varian SpectrAA-55B, Varian, CA, EUA). O potássio (K^+) trocável e o fósforo (P) foram extraídos também por resina, sendo o K^+ determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$) foi estimada pelo método do pH SMP. O enxofre foi extraído por solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e posteriormente a medição da turbidez formada pela precipitação do sulfato pelo cloreto de bário, em colorimetria. Com esses resultados, foram calculadas a soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 e a saturação por bases (V).

Os teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn no solo foram obtidos por meio do extrator químico DTPA em pH 7,3 (Abreu, Abreu e Andrade, 2001), sendo procedida a determinação por EAA. O teor de B no solo foi avaliado por meio de extração com cloreto de bário, usando aquecimento com forno de micro-ondas e quantificado em espectrofotômetro UV-VIS (Modelo Varian Cary-50, Varian, Victoria, Australia) a 420 nm (Abreu, Abreu e Andrade, 2001).

2.2.6 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise da variância sendo aplicado o teste F e, quando significativas, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$) para as variáveis qualitativas. Posteriormente, apenas para os tratamentos com aplicação de CLE, foi realizada análise de regressão polinomial para verificar o efeito das doses. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa AgroEstat (Barbosa e Júnior, 2015) e por meio do software R (R Core Team 2023).

2.2.7 Resultados e Discussão

Avaliando o efeito da aplicação das doses de CLE (variando de 0,0 a 7,5 t ha⁻¹, base úmida) na profundidade de 0,00–0,25 m, as quantidades de MO, pH, H+Al, S e B não apresentaram respostas significativas nas duas safras 20/21 e 21/22 (Tabela 4). Na 1ª soca, os teores de Ca, P, S, B, Fe e Mn não apresentaram incrementos entre os tratamentos estudados. Por outro lado, observou-se aumento linear para Cu e Zn em resposta à aplicação das doses de CLE, variando de 0,8 a 1,3 mg dm⁻³ para Cu e de 0,59 e 2,3 mg dm⁻³ para o Zn. Para a 2ª soca, observou-se ajuste quadrático positivo para SB, V, CTC, e Ca.

Os teores de K e Mg expressaram respostas significativas nos dois cultivos, com ajuste quadrático positivo sendo que as doses 2,6 e 7,0 t ha⁻¹ de CLE proporcionaram maiores quantidades destes nutrientes, respectivamente. Os efeitos positivos da aplicação de CLE no aumento da MO, CTC e macronutrientes (e.g., P, Ca e Mg) já foi relatado na literatura (Balaganesh *et al.*, 2020; Delibacak, Voronina e Morachevskaya, 2020; Gonçalves *et al.*, 2021). De acordo com esses autores, isso ocorre, pois, a MO melhora a estrutura do solo e a retenção de água, enquanto a CTC permite uma maior disponibilidade de nutrientes para as plantas. Por outro lado, na camada subsuperficial, não foram observadas alterações para CTC, H+Al, MO, pH, SB, V, B, Ca, Fe, Mg e S. No entanto, houve incremento nos teores de K e Mn nos dois anos estudados, sendo notado ajuste quadrático, com a dose 2,2 t ha⁻¹ de CLE apresentando o maior teor de Mn. Assim, verificou-se que a doses de 7,5 t ha⁻¹ de CLE, proporcionou o maior teor de Mn no solo (7,6 mg dm⁻³). Houve aumento linear dos teores de Cu e Zn na 1ª soca, enquanto os teores de P apresentaram ajuste quadrático na camada subsuperficial (Tabela 4). No caso do P, a dose de 5,0 t ha⁻¹ de CLE promoveu o maior teor deste nutriente no solo (26 mg dm⁻³) na camada de 0,00–0,25 m de profundidade. No caso do teor de Zn, os valores variaram de 0,6 a 2,3 mg dm⁻³.

Os tratamentos T6 e T7 apresentaram os maiores incrementos de MO na camada superficial, correspondendo a 18 e 15% de aumento, respectivamente, ao longo dos anos, se comparados ao T1 na 1ª soca. Foi possível observar, que todos os tratamentos que receberam doses de CLE aumentaram os teores de MO, principalmente para a 1ª soca, com uma média de aumento de 25% quando comparado a 2ª soca (Figura 3ª). Na subsuperfície, observou-se incremento em ambos os anos, com variação entre 23,2 g dm⁻³ e 26,3 g dm⁻³ na 1ª soca e entre 21,7 g dm⁻³ e 24,9 g dm⁻³ na 2ª soca (Figura 4ª). O aumento da MO beneficia as condições

do solo, promovendo melhor agregação, maior atividade microbiana, maior retenção de água, contribuindo para a saúde e fertilidade do solo, resultados estes encontrados em experimentos de curto e médio prazo utilizando diferentes dose de CLE (Börjesson e Kätterer, 2018; Curci *et al.*, 2020; Farsang *et al.*, 2020).

Os valores de pH do solo em superfície, variaram de 5,1 a 5,8 na primeira soca e para a segunda soca de 4,5 a 5,5. Os menores valores de pH foram observados nos tratamentos T1, T5, T8, T9, T10 e T11 em ambas os anos. Na camada de 0,00–0,25 m, os tratamentos T4 e T6 mostraram diferenças entre os anos agrícolas, com maiores valores observados nos tratamentos T4 e T6 com 5,8 e 5,5, respectivamente (Figura 3b). Não houve diferenças nos teores de pH na camada de 0,25–0,50 m entre as safras, porém os tratamentos T1 e T3 apresentaram pH de 5,2 e 5,1, enquanto os tratamentos T7 e T10 mostraram os menores valores, com pH de 4,5 e 4,6, respectivamente (Figura 4b). Estudos relatam que o aumento do valor de pH utilizando lodo de esgoto compostado em doses que variaram entre 0 a 40 t ha⁻¹, em solos com baixa fertilidade (Prates *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021; Lacerda *et al.*, 2022).

Notou-se redução de 6 a 15% na H+Al nos tratamentos T2, T6 e T4 na camada superficial nos dois anos. Da mesma forma, na camada subsuperficial, verificou-se diferenças nos valores de H+Al entre os anos, com médias mais elevadas nos tratamentos T3, T5 e T9 (Figura 3c). Observou-se redução de até 5% nos valores de H+Al, nos tratamentos T3 e T11 (Figura 4c). Estudos que avaliaram o LE como matéria prima para a fabricação de biossólidos e/ou compostagem evidenciaram aumento de pH e diminuição da acidez potencial (Bonini *et al.*, 2015; Titova e Baltrėnaitė, 2021). Esses autores relataram que o CLE é rico em substâncias alcalinas como Ca e Mg, aumenta o pH do solo por meio de reações com os ácidos presentes. Além disso, a decomposição da MO do lodo acelera a liberação de íons hidrogênio, responsáveis pela acidez potencial do solo, resultando na redução dessa acidez.

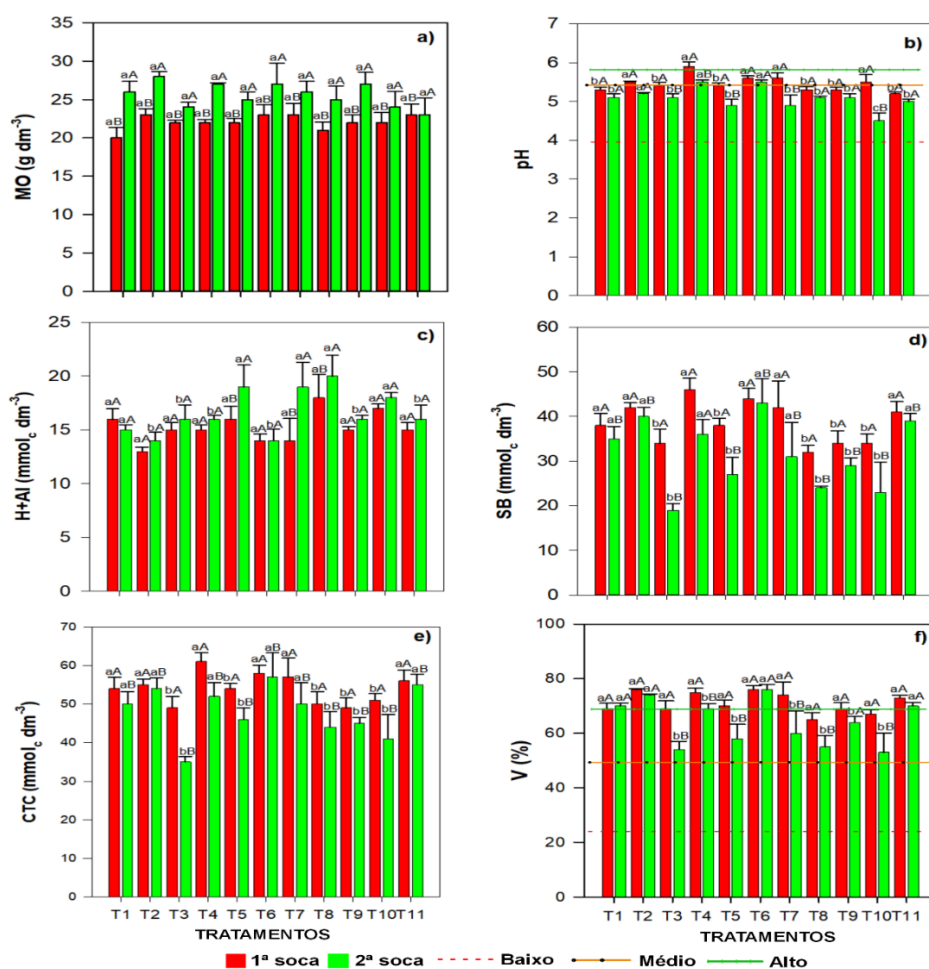
Tabela 3 - Análise de regressão de atributos químicos de solo de amostras coletadas nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade, após a colheita da cana-açúcar 1ª e 2ª soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha⁻¹, base úmida

Atributo	1ª soca (2020/21)			2ª soca (2021/22)		
	Equação	R ²	F	Equação	R ²	F
<i>Profundidade 0,00–0,25 m</i>						
MO	$\hat{Y} = 24,16$	-	NS	$\hat{Y} = 23,98$	-	NS
pH	$\hat{Y} = 5,18$	-	NS	$\hat{Y} = 5,24$	-	NS
H+Al	$\hat{Y} = 14,61$	-	NS	$\hat{Y} = 15,00$	-	NS
SB	$\hat{Y} = 37,41$	-	NS	$\hat{Y} = 40,35$	-	NS
V	$\hat{Y} = 72,37$	-	NS	$\hat{Y} = 73,39$	-	NS
CTC	$\hat{Y} = 52,01$	-	NS	$\hat{Y} = 55,35 - 4,116x + 0,534x^2$	0,78	10,47**
P	$\hat{Y} = 21,50$	-	NS	$\hat{Y} = 12,84 + 3,009X - 0,457X^2$	0,56	9,52**
K	$\hat{Y} = 1,77 - 0,213X + 0,039X^2$	0,91	15,12**	$\hat{Y} = 1,15 - 0,076X + 0,042X^2$	0,97	17,50**
Ca	$\hat{Y} = 24,25$	-	NS	$\hat{Y} = 25,85$	-	NS
Mg	$\hat{Y} = 9,95 + 0,583X$	0,62	6,65*	$\hat{Y} = 15,76 - 2,893X + 0,293X^2$	0,54	8,42*
S	$\hat{Y} = 5,88$	-	NS	$\hat{Y} = 5,96$	-	NS
B	$\hat{Y} = 0,30$	-	NS	$\hat{Y} = 0,32$	-	NS
Cu	$\hat{Y} = 0,75 + 0,063X$	0,90	37,51**	$\hat{Y} = 0,73$	-	NS
Fe	$\hat{Y} = 21,19$	-	NS	$\hat{Y} = 22,50$	-	NS
Mn	$\hat{Y} = 13,14$	-	NS	$\hat{Y} = 13,12$	-	NS
Zn	$\hat{Y} = 0,62 + 0,189X$	0,93	51,67**	$\hat{Y} = 0,50$	-	NS
<i>Profundidade 0,25–0,50 m</i>						
MO	$\hat{Y} = 17,05$	-	NS	$\hat{Y} = 21,08$	-	NS
pH	$\hat{Y} = 4,94$	-	NS	$\hat{Y} = 4,93$	-	NS
H+Al	$\hat{Y} = 17,38$	-	NS	$\hat{Y} = 18,12$	-	NS
SB	$\hat{Y} = 26,02$	-	NS	$\hat{Y} = 27,78$	-	NS
V	$\hat{Y} = 59,25$	-	NS	$\hat{Y} = 59,80$	-	NS
CTC	$\hat{Y} = 43,41$	-	NS	$\hat{Y} = 45,84$	-	NS
P	$\hat{Y} = 8,56$	-	NS	$\hat{Y} = 8,53 + 2,987X - 0,413X^2$	0,51	9,05*
K	$\hat{Y} = 1,19 + 0,102X$	0,79	10,96**	$\hat{Y} = 3,18 - 0,893X + 0,114X^2$	0,94	69,4**
Ca	$\hat{Y} = 15,95$	-	NS	$\hat{Y} = 16,60$	-	NS
Mg	$\hat{Y} = 8,24$	-	NS	$\hat{Y} = 8,30$	-	NS
S	$\hat{Y} = 9,44$	-	NS	$\hat{Y} = 8,56$	-	NS
B	$\hat{Y} = 0,07$	-	NS	$\hat{Y} = 0,08$	-	NS
Cu	$\hat{Y} = 0,29 + 0,0153X$	0,85	19,24**	$\hat{Y} = 0,31$	-	NS
Fe	$\hat{Y} = 17,66$	-	NS	$\hat{Y} = 17,14$	-	NS
Mn	$\hat{Y} = 6,91$	-	NS	$\hat{Y} = 8,32 - 2,081X + 0,226X^2$	0,99	12,14**
Zn	$\hat{Y} = 0,26$	-	NS	$\hat{Y} = 0,28 - 0,031X$	0,86	25,82**

Fonte: Do próprio autor

*, ** e NS: significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente. MO: Matéria orgânica do solo. CTC: Capacidade de troca catiônica. SB: Soma de bases. V: Saturação por bases.

Figura 3 - Matéria orgânica – MO (a), acidez ativa – pH (b), acidez potencial – H+Al (c), soma de bases – V (f) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,00–0,25 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos



Fonte: Do próprio autor

Nota: **1ª soca**: T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca**: T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = Residual de 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, n = 4). As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Cantarella et al. (2022) para solos do Estado de São Paulo, Brasil.

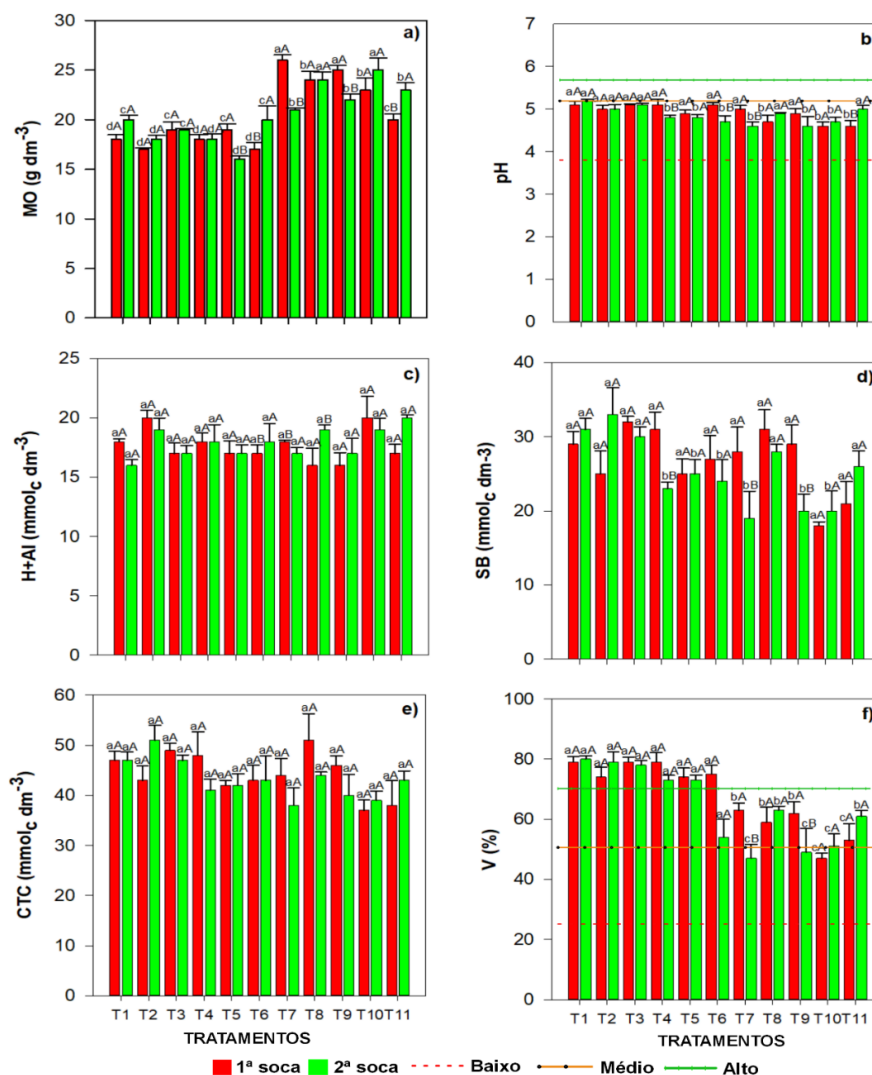
Foram observadas diferenças significativas nos valores de saturação por bases (SB) entre os tratamentos na camada de 0,00–0,25 m. A análise das duas safras revelou uma interação que gerou variações nos valores de SB, com destaque para os

tratamentos T2, T4 e T6 (Figura 3d). É importante ressaltar que essa interação nos dois anos safra resultou em uma redução de até 20% nos valores de SB na 2ª soca. Essa redução pode estar relacionada ao processo de extração de cátions trocáveis, principalmente, Ca e Mg pelas plantas (Oliveira *et al.*, 2011; Silva e Prado, 2021; Bono *et al.*, 2021; Wanderley *et al.*, 2021). Por outro lado, na camada de 0,25–0,50 m de profundidade, com exceção do tratamento T2 no segundo ano agrícola, não foram observadas influências significativas dos tratamentos nos valores de SB, tanto na 1ª quanto na 2ª soca (Figura 4d).

De modo similar ao observado para a SB, a CTC diferiu em função dos tratamentos, sendo notado maiores valores desse atributo nos tratamentos T4 e T6, na camada superficial (Figura 3e). Já para a camada subsuperficial os maiores valores de CTC foram notados nos tratamentos T3, T4 e T8. Nestes tratamentos, houve redução desse atributo, da 1ª soca para a 2ª soca, nas seguintes proporções: 1,5 e 13%, respectivamente (Figura 4e). A utilização dos nutrientes pelas plantas pode ter reduzido os valores de CTC no solo. Tal efeito é devido à mineralização de parte da MO, que ocorre de forma rápida em condições tropicais, principalmente em solos arenosos. Haja vista que as plantas consomem os nutrientes disponíveis no solo para seu crescimento e desenvolvimento. Por outro lado, estudos corroboram a dinâmica da CTC em solos tratados com CLE e associações, onde puderam observar a disponibilidade deste atributo no solo (Bonini, Alves e Montanari, 2015; Masmoudi *et al.*, 2020; Oueriemmi *et al.*, 2021).

Os valores médios de V na camada superficial variaram de 65 a 75% para a 1ª soca e de 53 a 75% para a 2ª soca (Figura 3f). No terceiro ano agrícola, apenas os tratamentos T1, T2, T6 e T11 apresentaram variação, sobressaindo sobre os demais tratamentos. Na 1ª soca, não se constatou diferenças nos valores de V, sendo os tratamentos T8 e T10 com menores valores. Para a camada subsuperficial, observou-se incremento para os tratamentos T3, T4 e T6 (Figura 4f). Foi verificado também, ajuste quadrático para V em função dos tratamentos com apenas doses de CLE (Tabela 3). Isso implica que a porcentagem de bases trocáveis nessa profundidade, foram proporcionados pelas doses de CLE (Cardoso *et al.*, 2022; Guimarães, Matos e Carpaneze, 2022). Vale a pena ressaltar que teores acima de 70% são considerados altos, conforme os limites de interpretação estabelecidos para solos do estado de São Paulo (Cantarella *et al.*, 2022).

Figura 4 - Matéria orgânica – MO (a), acidez ativa – pH (b), acidez potencial – H+Al (c), soma de bases – SB (d) capacidade de troca catiônica – CTC (e) e saturação de bases – V (f) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,25–0,50 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos



Fonte: Do próprio autor

Nota: **1ª soca**: T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca**: T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O), T3 = Residual de 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, $n = 4$). As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Cantarella et al. (2022) para solos do Estado de São Paulo, Brasil.

Quanto aos teores médios de macronutrientes na camada de 0,00–0,25 m de profundidade, pôde-se notar variação de: P = 12–34 mg dm⁻³; K = 1,5–2,4 mmol_c dm⁻³; Ca = 21–28 mmol_c dm⁻³; Mg = 9–15 mmol_c dm⁻³ e S = 4–6 mg dm⁻³ na 1ª soca e P = 8–25 mg dm⁻³; K = 1,1–3,3 mmol_c dm⁻³; Ca = 12–27 mmol_c dm⁻³; Mg = 5–15 mmol_c dm⁻³ e S = 5–8 mg dm⁻³ na 2ª soca (Figura 5).

Após a colheita da 1ª soca, observou-se que os teores médios de P na camada superficial do solo apresentaram valores médios de 16 a 40 mg dm⁻³, com exceção do tratamento T1, que foi considerado baixo com teores de 7 a 15 mg dm⁻³. Na 2ª soca, os teores de P foram classificados como baixos (7–16 mg dm⁻³) para os tratamentos T1, T3, T4, T5, T6, T8, T9 e T10, e médios (16–40 mg dm⁻³) para os tratamentos T7, T2 e T11 (Figura 5a), com base nos limites de interpretação estabelecidos por (Cantarella *et al.*, 2022). Esses resultados confirmam que o uso do CLE, com ou sem AMC, foi capaz de manter os teores de P no solo, inclusive em termos de ação residual. Estudos anteriores também relataram resultados semelhantes, destacando a eficiência do CLE na manutenção dos teores de P no solo, tal efeito pode reduzir a fixação do fosfato devido à presença de ácidos húmicos e fúlvicos, que são compostos orgânicos presentes no lodo de esgoto. Esses ácidos orgânicos têm a capacidade de se ligar aos íons de fosfato no solo, tornando-os mais solúveis e, portanto, mais disponíveis para as plantas (Alves *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2022).

Para a camada de 0,25–0,50 m, os teores de P variaram de 5–17 mg dm⁻³, K variou de 1,3–3,2 mmol_c dm⁻³, Ca variou de 10–20 mmol_c dm⁻³, Mg variou de 6–12 mmol_c dm⁻³ e S variou de 5–10 mg dm⁻³ na 1ª soca. Na 2ª soca, os teores de P variaram de 6 a 17 mg dm⁻³, K variou de 1,1 a 3,2 mmol_c dm⁻³, Ca variou de 10 a 20 mmol_c dm⁻³, Mg variou de 6 a 11 mmol_c dm⁻³ e S variou de 5 a 15 mg dm⁻³ (Figura 6a). Os teores de P para o segundo ano agrícola foram classificados como muito baixos (T6, T9 e T11), baixos (T1, T2, T3, T5, T8 e T10) e médios (T4 e T7), exceto para o tratamento T9, que foi classificado como teor médio (17–40 mg dm⁻³) (Cantarella *et al.*, 2022). No segundo ano safra, todos os tratamentos, exceto T9, apresentaram teores muito baixos (0–7 mg dm⁻³) (Figura 5a).

O baixo teor de P, especialmente na 2ª soca, pode estar relacionada à adsorção ou fixação do elemento no solo, tornando-o indisponível. Esse efeito é agravado pelo baixo pH do solo, que pode reduzir e até mesmo limitar a disponibilidade de P. Estudos anteriores relataram resultados semelhantes, destacando a influência do pH do solo na disponibilidade de P (Chen *et al.*, 2020; Filipović *et al.*, 2020; Vinha *et al.*, 2021).

Tal fato ocorre em função do pH do solo desempenhar um papel importante na disponibilidade de P para as plantas. Em solos ácidos, o P pode se fixar a íons de ferro, alumínio e manganês, tornando-se indisponível.

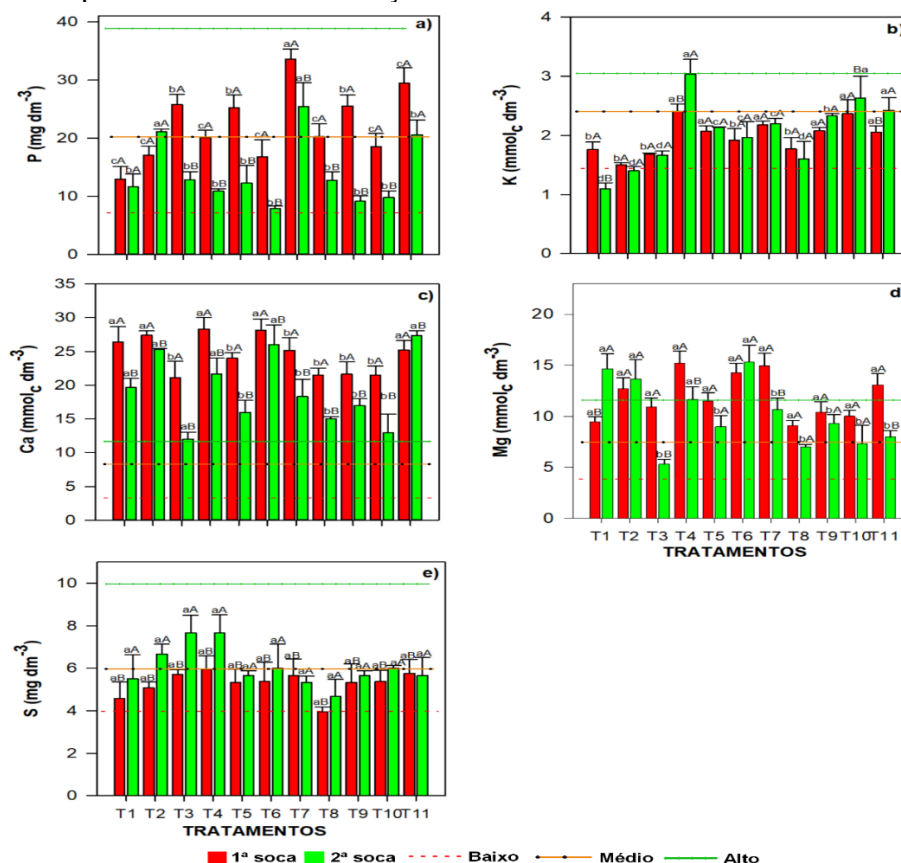
Observou-se um aumento significativo nos teores de K nos tratamentos T4 e T11, com incrementos de 26% e 20%, respectivamente, na camada superficial do solo (Figura 5b) na 1ª soca. A aplicação da adubação mineral convencional no tratamento T11 (7,5 t ha⁻¹+100% AMC) foi eficiente em elevar os teores de K no solo. Além disso, a dose de 7,5 t ha⁻¹ de CLE também resultou em um aumento dos teores de K de médio (1,6–3,0 mmolc dm⁻³) para alto (3,1–6,0 mmolc dm⁻³), quando comparado com a adubação mineral. Esse efeito foi corroborado pelo ajuste quadrático observado entre as doses de CLE aplicadas (0–7,5 t ha⁻¹). Apesar do CLE não possuir concentrações elevadas de K, pesquisadores têm mostrado o potencial do uso de CLE no aumento dos teores de K no solo (Curci *et al.*, 2020; Dridi *et al.*, 2020).

Consequentemente, os teores de K na 1ª soca foram principalmente médios, com exceção dos tratamentos T2 e T3, que apresentaram teores baixos variando entre 0,7 e 1,6 mmolc dm⁻³. Para a 2ª soca, os teores de K trocável variaram entre baixos (T1, T2, T3 e T8), médios (T3, T5, T7, T9 e T10) e altos (T4 e T11) (Figura 6b). Na camada subsuperficial, observou-se que o tratamento T11 diferiu dos demais em ambas as safras, no entanto, apresentou uma redução de 35% nos teores de K na 2ª soca. Além disso, foi observado um incremento de 31% nos teores de K no tratamento T6 (0,0 CLE t ha⁻¹ + AMC 50%). Esse aumento pode ser atribuído à dose de adubação mineral convencional, uma vez que não houve reaplicação CLE na 2ª soca. Quanto à classificação dos teores de K na camada subsuperficial (Figura 6b), na primeira soca os tratamentos foram classificados como baixos (T1, T2, T7 e T10), médios (T3, T4, T5, T6, T8 e T9) e alto (T11). Enquanto na 2ª soca, predominaram os teores baixos (T1 e T3) e médios de K (T2, T3, T4, T7, T8, T9 e T10).

Os tratamentos T4, T6 e T2 na 1ª soca e T2, T4, T6 e T11 na 2ª soca, apresentaram os maiores teores de Ca na camada superficial (Figura 5c). O CLE possui em sua formulação Ca, oriundo da adição de calcário agrícola no processo de compostagem para fins de redução de acidez e redução de odores do composto orgânico. Nota-se que estes tratamentos continham doses de 2,5 e 7,5 CLE t ha⁻¹ (T4 e T5) e 2,5 t ha⁻¹ associado a 50% da AMC (T6). Em virtude do aumento do teor de Ca entre os tratamentos e a estabilidade em função dos anos, comprova-se que o CLE pode ser utilizado como fornecedor de Ca inclusive atuando na elevação do pH

do solo (Figura 3b). É importante destacar que na 1ª soca, nenhum dos tratamentos recebeu a aplicação de calcário e gesso agrícola. Fica evidente portanto, a atuação do CLE na eficiência de reposição deste nutriente.

Figura 5 - Teores de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) e S (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,00–0,25 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos



Fonte: Do próprio autor

Nota: 1ª soca: T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha^{-1} de N, 0 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 90 kg ha^{-1} de K_2O); T3 = $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T4 = $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T5 = $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T6 = $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T7 = $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T8 = $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T9 = $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T10 = $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T11 = $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca:** T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha^{-1} de N e 75 kg ha^{-1} de K_2O); T3 = Residual de $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T4 = R $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T5 = R $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T6 = R $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T7 = R $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T8 = R $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T9 = R $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T10 = R $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T11 = R $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média $\pm$ SE, $n = 4$). As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Cantarella et al. (2022) para solos do Estado de São Paulo, Brasil.

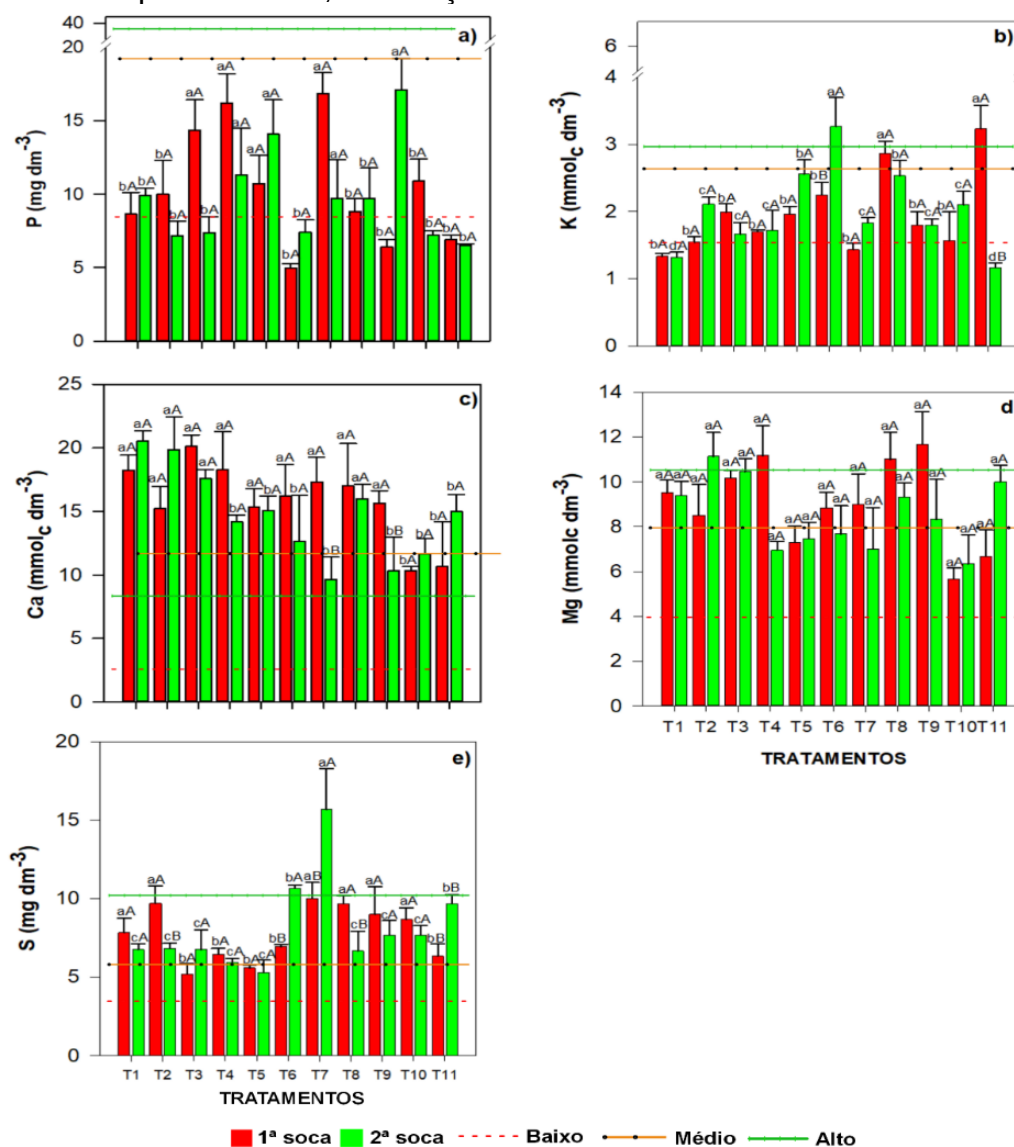
Os teores de Ca na camada subsuperficial apresentaram uma faixa de variação de $10\text{--}20 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ na 1ª soca e $10\text{--}21 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ na 2ª soca. Os tratamentos T8 e T11 na 1ª soca, assim como o tratamento T6 na 2ª soca, exibiram os maiores teores

de Ca (Figura 6c). De acordo com Cantarella *et al.* (2022), teores de Ca acima de $7,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ são considerados altos. Portanto, todos os tratamentos avaliados, tanto na 1ª quanto na 2ª soca, em ambas as camadas, apresentaram teores altos de Ca. No entanto, é importante ressaltar que o aumento dos teores de Ca na subsuperfície se deve à aplicação de calcário e gesso agrícola no manejo agrícola da 2ª soca. Essa aplicação resulta na dissolução do sulfato de cálcio, liberando íons de sulfato e cálcio. Esses íons possuem alta mobilidade no solo, o que facilita seu deslocamento para a subsuperfície (Bhatt, 2020; Andrade *et al.*, 2021; Luiz *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022). As doses de $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE (T4), $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ e $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ com 50% de AMC (T6 e T7), proporcionaram maiores teores de Mg na camada superficial, diferindo-se entre os tratamentos e os anos (Figura 5d).

Com exceção dos tratamentos T3, T8 e T11 na 1ª soca, que apresentaram teores médios de Mg ($5\text{--}8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), todos os demais tratamentos foram classificados como teores altos de Mg ($> 8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em ambos os anos. Observa-se uma relação direta entre o aumento de Mg no solo e as doses de CLE aplicadas. Além disso, é importante destacar que esses tratamentos apresentaram alta CTC (Figura 3e), o que influenciou o aumento da capacidade do solo em fornecer Mg às plantas, devido à maior reserva do nutriente retido nos colóides do solo (Prates *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022a). No entanto, para a camada de $0,25\text{--}0,50 \text{ m}$ de profundidade, os teores de Mg não apresentaram um incremento significativo em função dos tratamentos e dos anos (Figura 6d). Contudo, 63% dos tratamentos foram classificados com teores altos de Mg tanto na 1ª quanto na 2ª soca. Portanto, é válido ressaltar que o efeito residual do CLE nos tratamentos estudados possibilitou um aporte de Mg ao solo.

Foi observado aumento significativo de 25 e 22% nos teores S nos tratamentos T3 e T4 ao longo dos anos experimentais, especificamente na camada superficial do solo. Os teores deste nutriente variaram de $4\text{--}6 \text{ mg dm}^{-3}$ na 1ª soca e de $5\text{--}8 \text{ mg dm}^{-3}$ na 2ª soca, não havendo diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 5e). Apenas os tratamentos T1, T8 foram classificados com teores baixo ($0\text{--}4 \text{ mg dm}^{-3}$), os demais tratamentos permaneceram com teores médios ($5\text{--}10 \text{ mg dm}^{-3}$). Observou-se incremento significativo nos teores de S entre os anos e tratamentos na camada subsuperficial.

Figura 6 - Teores de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) e S (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,25–0,50 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos



Fonte: Do próprio autor

Nota: **1ª soca:** T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha^{-1} de N, 0 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 90 kg ha^{-1} de K_2O); T3 = $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T4 = $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T5 = $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T6 = $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T7 = $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T8 = $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T9 = $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T10 = $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T11 = $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca:** T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha^{-1} de N e 75 kg ha^{-1} de K_2O); T3 = Residual de $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T4 = R $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T5 = R $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE; T6 = R $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T7 = R $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T8 = R $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T9 = R $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T10 = R $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T11 = R $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média $\pm$ SE, $n = 4$). As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Cantarella et al. (2022) para solos do Estado de São Paulo, Brasil.

Em função dos anos verificou-se um incremento de 33% para o tratamento T7. Além disso, constatou-se uma elevação nos teores de S de médio ($5\text{--}10 \text{ mg dm}^{-3}$) na

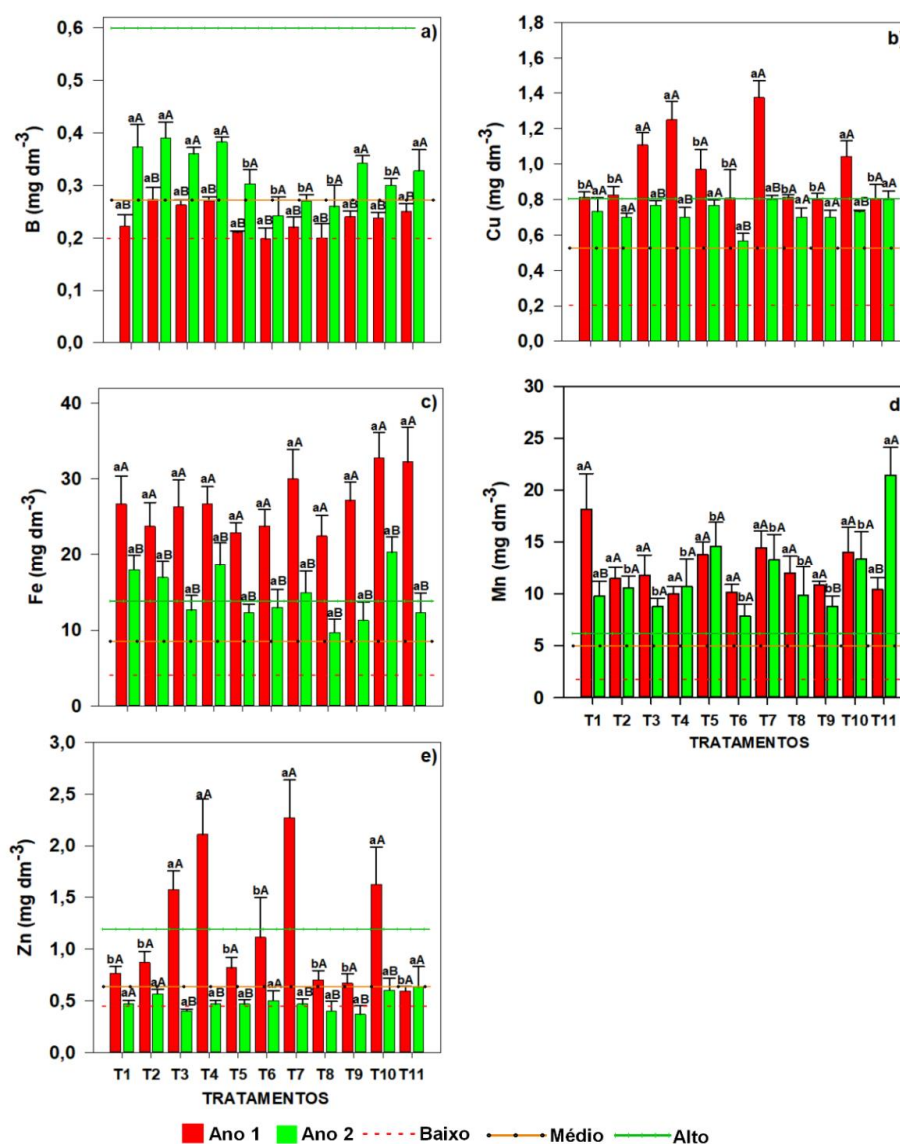
camada superficial para alto ($> 10 \text{ mg dm}^{-3}$) na camada subsuperficial, sendo os tratamentos T6 e T7 os que apresentaram as maiores concentrações deste nutriente (Figura 6e). Considerando a textura do solo arenosa da área experimental (Tabela 1), verificou-se que o S não permaneceu retido nessa camada, ocorrendo sua migração por meio da lixiviação. Esse processo foi favorecido pelas elevadas precipitações pluviais ocorridas nos meses de novembro e dezembro do segundo ano experimental (Figura 2), as quais contribuíram para a concentração desse nutriente na camada subsuperficial do solo.

A camada de 0,00–0,25 m, apresentou teores médios de micronutrientes, com a seguinte variação: B = 0,19–0,27 mg dm^{-3} ; Cu = 0,8–1,4 mg dm^{-3} ; Fe = 22–33 mg dm^{-3} ; Mn = 10–18 mg dm^{-3} e Zn = 0,6–2,3 mg dm^{-3} , no primeiro ano. No segundo ano, notou-se a seguinte variação: B = 0,24–0,40 mg dm^{-3} ; Cu = 0,5–0,8 mg dm^{-3} ; Fe = 10–20 mg dm^{-3} ; Mn = 8–21 mg dm^{-3} e Zn = 0,4–0,6 mg dm^{-3} (Figura 7).

Apesar de não haver diferenças nos teores de B entre os tratamentos, as concentrações deste micronutriente foi considerada como média (0,2–0,6 mg dm^{-3}) em ambos os anos agrícolas (Figura 7a). Por outro lado, verificou-se incremento dos teores de B para o segundo ano, nos tratamentos T1, T2, T3 e T4. Verifica-se que as maiores concentrações de B estão presentes das doses 2,5–7,5 t ha^{-1} de CLE. O aumento dos teores de B disponíveis no solo em efeito residual puderam ser observados em estudos que utilizaram doses 7,5 a 12,5 t ha^{-1} de CLE em solos degradados (Prates *et al.*, 2022b; Oliveira *et al.*, 2023). Na camada subsuperficial todos os tratamentos foram classificados com teores baixo (0,0–0,2 mg dm^{-3}) nos anos estudados. Entretanto, observaram-se diferenças entre os tratamentos e anos, sendo os tratamentos T2, T4, T5 e T8 com maiores concentrações (Figura 8b). Solos arenosos geralmente possuem baixo teor de B, principalmente em subsuperfície. A baixa disponibilidade do nutriente acentuada à baixa MO e a lixiviação podem justificar os baixos teores de B na profundidade estudada.

Os teores Cu na camada superficial foram considerados altos ($> 0,8 \text{ mg dm}^{-3}$) na 1ª soca, com os tratamentos T3, T4, T7 e T10 apresentando maior responsividade. Na 2ª soca, com exceção dos tratamentos T7 e T11, teor alto ($> 0,8 \text{ mg dm}^{-3}$), os demais tratamentos foram classificados como teores médios (0,3–0,8 mg dm^{-3}) (Figura 7b).

Figura 7 - Teores de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,0–0,25 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos



Fonte: Do próprio autor

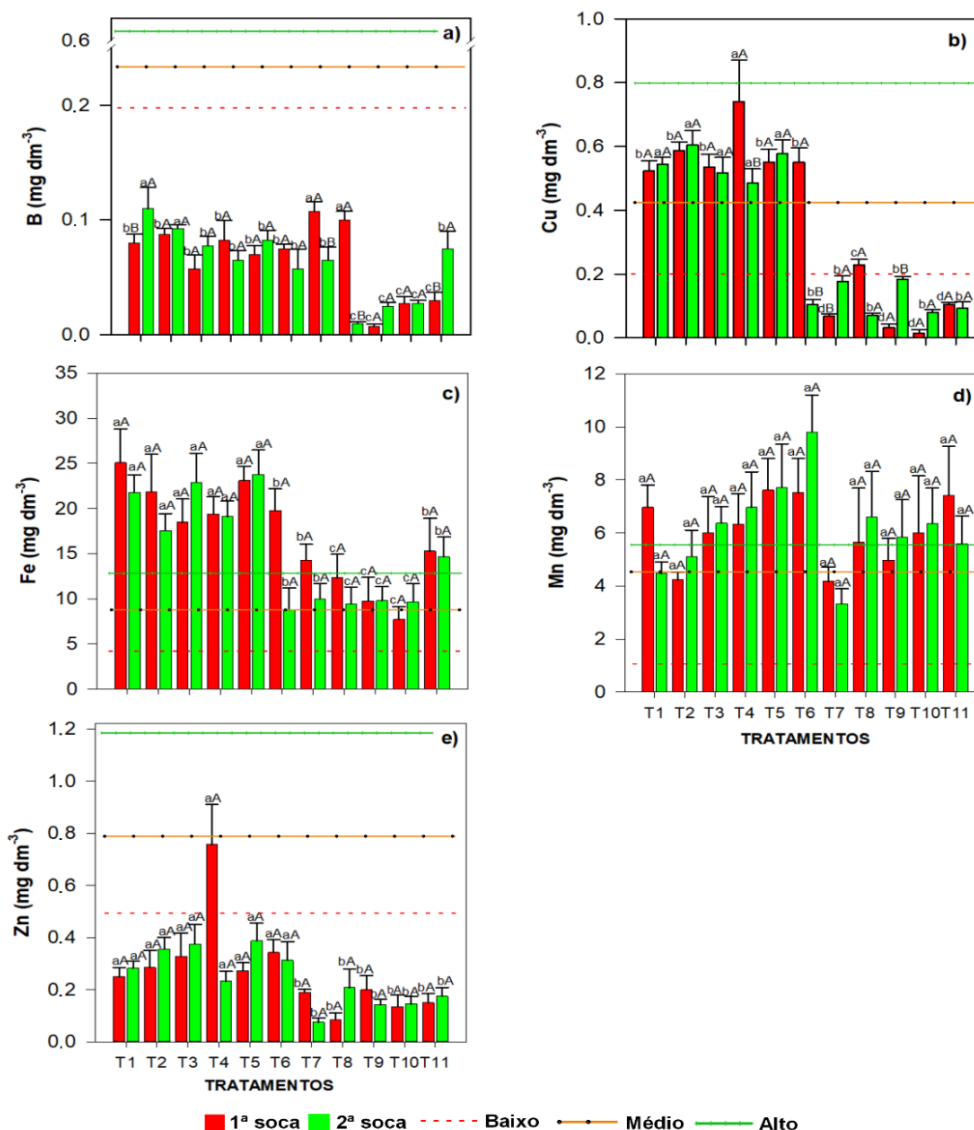
Nota: **1ª soca:** T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca:** T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O), T3 = Residual de 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, n = 4). As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Cantarella et al. (2022) para solos do Estado de São Paulo, Brasil.

Na camada subsuperficial, foram observadas diferenças entre os tratamentos e anos, com o tratamento T4 apresentando o maior teor de Cu (Figura 8b). Destaca-se o ajuste linear para Cu (Tabela 3) ao comparar apenas as doses de CLE (2,5–7,5 t ha⁻¹), evidenciando que quanto maior a dose de CLE, maior a disponibilidade de Cu no solo. No entanto, é importante ressaltar que alguns tratamentos apresentaram uma redução de 17 a 20% nos teores de Cu a partir do tratamento T6 (Figura 8b). Tal fato pode ocorrer devido a fixação do Cu em formas menos solúveis em solo arenoso é influenciada pela sua menor capacidade de retenção e adsorção, o que pode levar a uma menor disponibilidade do nutriente para as plantas (Kuziemska, Trębicka e Wysokinski, 2021; Rangel *et al.*, 2023).

Verificou-se que os teores de Fe diferiram em função dos anos, sendo notados maiores valores no primeiro ano nos tratamentos T7, T9 e T10. Contudo, não houve efeito dos tratamentos nos teores de Fe na camada superficial (Figura 7c). Ainda assim, deve-se mencionar que todos os tratamentos em ambos os anos permaneceram altos (> 12 mg dm⁻³), exceto tratamento T8. Paralelamente na camada de 0,25–0,50 m de profundidade, os teores de Fe foram considerados como: médio (5–12 mg dm⁻³) tratamentos T9 e T10 no primeiro ano e tores altos (> 12 mg dm⁻³) para os tratamentos T6, T7, T8, T9 e T10 (Figura 8c). Os solos em regiões de clima tropical, de maneira geral, possuem elevadas concentrações de Fe devido às condições climáticas favoráveis à intensa ação do intemperismo. Entre as classes de solo, destaca-se a presença predominante desse micronutriente em sua composição química nos Latossolos (Fernandes *et al.*, 2004; Karlsson *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2020; Cantão *et al.*, 2021;).

Não foi possível observar diferenças entre os tratamentos estudados para os teores de Mn na camada de 0,00–0,25 m de profundidade, conforme mostrado na Figura 7d. No entanto, tais teores foram classificados como alto (> 5 mg dm⁻³) em todos os tratamentos no primeiro ano experimental. Na 2ª soca, o efeito residual das doses de CLE associada ou não a AMC permitiu que os teores de Mn permanecessem em teores altos. Esses resultados demonstram a disponibilidade do micronutriente em função dos tratamentos de CLE, inclusive em efeito residual (Tabela 3). Por outro lado, a presença de nutrientes como N e K da adubação mineral também pôde influenciar a absorção de Mn do solo pelas plantas (Vasconcelos *et al.*, 2020; Vijayakumar *et al.*, 2020).

Figura 8 - Teores de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) nas amostras de solo coletadas após o cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas 0,25–0,50 m de profundidade, em função dos tratamentos e dos anos



Fonte: Do próprio autor

Nota: **1ª soca:** T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca:** T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O), T3 = Residual de 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, n = 4). As linhas representam os limites de interpretação estabelecidos por Cantarella et al. (2022) para solos do Estado de São Paulo, Brasil.

Os teores de Mn na camada subsuperficial apresentaram comportamento similar à camada superficial, todos os tratamentos foram classificados com teores altos nos dois anos safra, exceto o tratamento T2 e T7 na 1ª soca e T1 e T7, classificados com teor baixo de Mn ($0\text{--}4\text{ mg dm}^{-3}$) (Figura 8d). As doses de 2,5 e 5,0 t ha^{-1} de CLE (T3 e T4) resultaram em incremento significativo nos teores de Zn no solo, especialmente na camada superficial (Figura 7e).

Da mesma forma, a aplicação das doses de 7,5 t ha^{-1} associadas a 50–100% da AMC demonstraram um aumento nos teores de Zn na 1ª soca. Na 2ª soca, observou-se um efeito residual dessas doses de CLE, resultando em teores médios de Zn estáveis. Vale ressaltar que o CLE possui uma concentração elevada de Zn, conforme demonstrado na caracterização do CLE, o que o torna uma fonte relevante de macro e micronutrientes. Diversos estudos realizados por pesquisadores, como Prates et al. (2022), Silva et al. (2022) e Oliveira et al. (2023), corroboram a evidência do aporte de micronutrientes por meio da aplicação desse fertilizante orgânico.

Apesar das diferenças significativas observadas entre os tratamentos e os anos analisados, na camada subsuperficial, apenas o tratamento T4 apresentou um teor de Zn de 0.75 mg dm^{-3} , caracterizado como médio para 1ª soca (Figura 8e). Os demais tratamentos foram considerados de baixo teor de Zn ($0,0\text{--}0,5\text{ mg dm}^{-3}$), com valores variando entre 0,07 e $0,75\text{ mg dm}^{-3}$, em função do tratamento e do ano agrícola estudado. Os baixos teores de Zn na camada subsuperficial podem estar associadas aos baixos teores de MO, baixa atividade microbiana e textura arenosa do solo (Tabela 2).

A utilização do CLE, tanto em base seca quanto úmida, associada ou não à adubação mineral convencional, em solos de baixa fertilidade cultivados com diversas culturas, incluindo a cana-de-açúcar, tem demonstrado aumentos nos teores de Zn, especialmente na camada superficial do solo (Sharma e Dhaliwal, 2019; Phung *et al.*, 2020; Cardoso *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022a; Oliveira *et al.*, 2002).

2.3 CONCLUSÃO

A aplicação de CLE associado ou não com a adubação mineral em solos cultivados com cana-de-açúcar, incrementou alguns atributos químicos do solo (MO, pH, SB, CTC e V) e os teores de nutrientes (P, K, Ca, Mg, B, Cu e Zn) na 1ª e 2ª soca, bem como em ambas as profundidades do solo investigadas. Os tratamentos que apresentaram os melhores desempenhos foram o T4 (5,0 t ha^{-1} de CLE) e o T7

(5,0 t ha⁻¹ de CLE + AMC 50%), melhorando estatisticamente a fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes nos dois ciclos de produção de cana-de-açúcar. Observou-se que o CLE tem o potencial para ser utilizado como fertilizante orgânico, podendo diminuir a necessidade de fertilizantes minerais convencionais e contribuir para a redução nos custos de produção e da dependência de fertilizantes minerais. Ao promover sua aplicação em solos tropicais de baixa fertilidade, outros diversos benefícios podem ser alcançados, como a economia circular, por meio da redução da produção e descarte de resíduos (tipicamente característicos da economia linear) com questões associadas à saúde humana e ao ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. F.; ABREU, C. A.; ANDRADE, J. C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. *In*: RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A (ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 231-239.
- ALVES, B. S. Q.; ZELAYA, K. P. S.; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; NAPOLI, A.; PARIKH, S. J.; FERNANDES, L. A. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere**, Beijing, v. 31, n. 4, p. 572-582, 1 ago. 2021.
- ANDRADE, P. K. B.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; SANTOS, R. L.; BEZERRA, N. S.; CRUZ, F. J. R. Atributos químicos de argissolo após gessagem e cultivo de cana-de-açúcar. **Geama**, Recife, v. 7, n. 1, p. 60-66, 23 abr. 2021.
- BALAGANESH, P.; VASUDEVAN, M.; SUNEETHKUMAR, S. M.; SHAHIR, S.; NATARAJAN, N. Evaluation of sugarcane and soil quality amended by sewage sludge derived compost and chemical fertilizer. **Nature Environment and Pollution Technology**, Pune, v. 19, n. 4, p. 1737-1741, 1 dez. 2020.
- BARBOSA, J. C.; JÚNIOR, W. M. **AgroEstat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: SPFCA/UNESP, 2015.
- BASTOS, L.; LIMA, D.; JUNIOR FARIA, N. O. A qualidade do emprego nas atividades de cana-de-açúcar, de fabricação de produtos têxteis, da metalurgia básica e da construção no Brasil nos anos de 2002, 2009 e 2015. **A Economia em Revista**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 15-33, 1 fev. 2023.
- BHATT, R. **Resources management for sustainable sugarcane production**. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6953-1_18. Acesso em: 24 mai. 2023.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 388-393, 2015.

BONO, J. A. M.; AGUIAR, E. B.; COSTA, R. M. S.; AGUENA, F. F.; RIBEIRO, J. D.; CORRÊA, M. P. M. Avaliação da eficácia agronômica do calcário fosfático no desenvolvimento fenológico e produtivo da cana-de-açúcar. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 10, n. 7, p. e49210716762-e49210716762, 30 jun. 2021.

BÖRJESSON, G.; KÄTTERER, T. Soil fertility effects of repeated application of sewage sludge in two 30-year-old field experiments. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 112, n. 3, p. 369-385, 1 dez. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 375 de 29/08/2006**. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-3752--006_103464.html. Acesso em: 29 abr. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Nº 498, DE 19 DE AGOSTO DE 2020** - DOU - Imprensa Nacional. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou>. Acesso em: 1 maio. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa SDA Nº 61 DE 08/07/2020** - Federal - LegisWeb. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=398558>. Acesso em: 29 abr. 2023.

CANTÃO, L. C.; SOUZA JÚNIOR, I. G.; SILVA, L. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; COSTA, A. C. S. Identification and quantification of iron oxides by diffuse reflectance spectroscopy with Praying Mantis accessory and integration sphere. **Catena**, Amsterdam, v. 196, p. 104899, 1 jan. 2021.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; JUNIOR, D. M.; BOARETO, R. M.; RAIJ, B. V. **Boletim 100**: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2022.

CARDOSO, P. H. S.; GONÇALVES, P. W. B.; ALVES, G. DE O.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A. Improving the quality of organic compost of sewage sludge using grass cultivation followed by composting. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 314, p. 115076, 15 jul. 2022.

CARPANEZ, T. G.; MOREIRA, V. R.; ASSIS, I. R.; AMARAL, M. C. S. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: opportunities and environmental risks. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 832, p. 154998, 1 ago. 2022.

CHEN, Y.; CHEN, X.; ZHANG, C.; TU, P.; DENG, L. Conversion of ammonium polyphosphate (App) in acidic soil and its effect on soil phosphorus availability.

Applied Ecology and Environmental Research, Budapest, v. 18, p. 4405-4415, 1 jul. 2020.

CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. *Land*, Basel, v. 10, n. 1, p. 72, jan. 2021.

COMPANHIA DE NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: 10. Brasília, DF. 2023. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 16 jun. 2023.

CURCI, M.; LAVECCHIA, A.; CUCCI, G.; LACOLLA, G.; CORATO, U.; CRECCHIO, C. Short-term effects of sewage sludge compost amendment on semiarid soil. **Soil Systems**, Basel, v. 4, n. 3, p. 48, set. 2020.

DAR, Z. A.; BHAT, J. I. A.; QAZI, G.; GANIE, S. A.; AMIN, A.; FAROOQ, S.; NAZIR, A.; RASOOL, A. Municipal sewage sludge, aquatic weed compost on soil enzymatic activity and heavy metal accumulation in Kale (*Brassica oleracea* L.). **Applied Water Science**, Heidelberg, v. 13, n. 2, p. 60, 4 jan. 2023.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A.; ZAMBON, J. L. C.; FILHO, J. C. B. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. 2010.

DELİBACAK, S.; VORONINA, L.; MORACHEVSKAYA, E. Use of sewage sludge in agricultural soils: Useful or harmful. **Eurasian Journal of Soil Science**, Samsun, v. 9, n. 2, p. 126-139, 1 abr. 2020.

DIAS, A. D. S.; SANTOS, C. C. Maximizando a produção de canaviais brasileiros: uma abordagem prática para implantação e manejo nutricional. In: SANTOS, C. C. (org). **Manejo fisiológico e nutricional de plantas**: abordagens práticas na agricultura. [S. l.]: Científica Digital, v. 1, n. 1, mar. 2023. p. 29-61. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/maximizando-a-producao-de-canaviais-brasileiros-uma-abordagem-pratica-para-implantacao-e-manejo-nutricional>. Acesso em: 29 abr. 2023.

DRIDI, N.; ROMDHANE, L.; FERREIRA, R.; SLEIMI, N. Fertilizer effect of composted sewage sludge and cattle manure on Pelargonium growth. **Water, Sanitation and Hygiene for Development**, London, v. 10, n. 4, p. 1019-1025, 26 ago. 2020.

FARSANG, A.; BABCSÁNYI, I.; LADÁNYI, Z.; PEREI, K.; BODOR, A.; CSÁNYI, K. T.; BARTA, K. Evaluating the effects of sewage sludge compost applications on the microbial activity, the nutrient and heavy metal content of a Chernozem soil in a field survey. **Arabian Journal of Geosciences**, Heidelberg, v. 13, n. 19, p. 982, 17 set. 2020.

FENG, J.; YANG, Y.; RUAN, K.; WU, D.; XU, Y.; JACOBS, D. F.; ZENG, S. Combined application of sewage sludge, bagasse, and molybdenum tailings ameliorates rare earth mining wasteland soil. **Journal of Soils and Sediments**, Heidelberg, v. 23, n. 4, p. 1775-1788, 1 abr. 2023.

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantification of iron oxides in Brazilian latosols by diffuse reflectance spectroscopy. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 245-257, abr. 2004.

FILHO, C. H. A. M.; SOUSA, R. S.; NETO, F. A.; SILVA, V. B.; DINIZ, Y. B.; JÚNIOR, G. M. C.; NASCIMENTO, F. N.; SILVA, R. R. C.; SOUSA, G. L. Avaliação de clones de cana-de-açúcar para produção de biomassa de qualidade na região canavieira do Piauí. **Peer Review**, Washington, DC, v. 5, n. 4, p. 188-204, 2 abr. 2023.

FILIPOVIĆ, V. *et al.* Modeling water flow and phosphorus sorption in a soil amended with sewage sludge and olive pomace as compost or biochar. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 8, p. 1163, ago. 2020.

GONÇALVES, C. A.; CAMARGO, R.; SOUSA, R. T. X.; SOARES, N. S.; OLIVEIRA, R. C.; STANGER, M. C.; LANA, R. M. Q.; LEMES, E. M. Chemical and technological attributes of sugarcane as functions of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge as organic matter sources. **Plos One**, San Francisco, v. 16, n. 12, p. e0236852, 15 dez. 2021.

GUIMARÃES, R. N.; MATOS, A. T.; CARPANEZ, T. G. Alterações químicas e sanitárias em solos e estéril de mineração receptores de lodo de esgoto sanitário, composto orgânico e fertilizante mineral. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 27, p. 783-793, 19 ago. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produto Interno Bruto - PIB** | IBGE. 2022, Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 24 abr. 2023.

JUNIOR, E. M. O. O papel da economia circular no processo de gestão do bagaço da cana-de-açúcar da usina Estreliana. **Caderno discente**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 1-17, 24 mar. 2023. Disponível em: <https://revistas.esuda.edu.br/index.php/Discente/article/download/878/357/2172#:~:text=A%20Economia%20Circular%2C%20por%20meio,transforma%C3%A7%C3%A3o%20em%20fonte%20de%20energia%2C>. Acesso em: 24 abr. 2023.

KARLSSON, T.; PERSSON, P.; SKYLLBERG, U.; MORTH, C. M.; GIESLER, R. Characterization of iron (III) in organic soils using extended X-ray absorption fine structure spectroscopy. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, v. 42, p. 5449-5454, 2008.

KAZIMIEROWICZ, J.; DĘBOWSKI, M. Characteristics of Solidified Carbon Dioxide and Perspectives for Its Sustainable Application in Sewage Sludge Management. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 24, n. 3, p. 2324, jan. 2023.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: [s. n], 1928.

KUZIEMSKA, B.; TRĘBICKA, J.; WYSOKINSKI, A. Uptake and utilization of nitrogen from organic fertilizers influenced by different doses of copper. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 6, p. 1219, jun. 2021.

LACERDA, S. M. P.; SILVA, J. O.; ROCHA, F. A.; OLIVEIRA, J. T.; SILVA, T. O.; NORONHA, R. H. F.; ALMEIDA, T. F.; FERRAZ, L. L. Reaproveitamento do iodo de esgoto da ETE do município de vitória da conquista na produção de mudas da *Leucanthemum maximum*. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, n. 1, p. 1279-1288, 7 jan. 2022.

LUIZ, M. S.; ZANÃO JUNIOR, L. A.; RIBEIRO, M. R.; MATOS, M. A.; ANDRADE, D. S. Residual effects of agricultural gypsum on soil chemical and microbiological characteristics. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 38, n. 4, p. 1656-1666, 2022.

MASMOUDI, S.; MAGDICH, S.; RIGANE, H.; MEDHIOUB, K.; REBAI, A.; AMMAR, E. Effects of compost and manure application rate on the soil physico-chemical layers properties and plant productivity. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 11, n. 5, p. 1883-1894, 1 mai. 2020.

MCCRAY, J. M.; RICE, R. W. Nutritional requirements and fertilizer recommendations for florida sugarcane: SS-AGR-228/SC028, rev. 1/2023. **EDIS**, Chicago, v. 2023, n. 1. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/sc028>. Acesso em: 24 abr. 2023.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, p. 579-588, set. 2011.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um latossolo amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 505-519, jun. 2002.

OLIVEIRA, G. S.; JALAL, A.; PRATES, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ALVES, R. S.; SILVA, L. C.; NASCIMENTO, R. E. N.; SILVA, P. S. T.; ARF, O.; GALINDO, F. S.; OLIVEIRA, F. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Common Bean Productivity and Micronutrients in the Soil-Plant System under Residual Applications of Composted Sewage Sludge. **Plants**, Basel, v. 12, n. 11, p. 2153, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/11/2153>. Acesso em: 24 abr. 2023.

OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M. DE; BOLONHEZI, D.; TOTTI, M. C. V.; MORAES, M. T.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, C. F. Tillage systems impact on soil physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-sprouted seedlings. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 223, p. 105460, 1 set. 2022.

OLIVEIRA, R. A.; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. S. **Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar**. Cutitiba: RIDESA, 2021.

OUERIEMMI, H.; KIDD, P. S.; TRASAR-CEPEDA, C.; RODRÍGUEZ-GARRIDO, B.; ZOGLHAMI, R. I.; ARDHAOU, K.; PRIETO-FERNÁNDEZ, Á.; MOUSSA, M. Evaluation of Composted Organic Wastes and Farmyard Manure for Improving

Fertility of Poor Sandy Soils in Arid Regions. **Agriculture**, Basel, v. 11, n. 5, p. 415, mai. 2021.

PANG, Z.; HUANG, J.; FALLAH, N.; LIN, W.; YUAN, Z.; HU, C. Combining N fertilization with biochar affects root-shoot growth, rhizosphere soil properties and bacterial communities under sugarcane monocropping. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 182, p. 114899, 1 ago. 2022.

PHUNG, L. D.; ICHIKAWA, M.; PHAM, D. V.; SASAKI, A.; WATANABE, T. High yield of protein-rich forage rice achieved by soil amendment with composted sewage sludge and topdressing with treated wastewater. **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 1, p. 10155, 23 jun. 2020.

PRATES, A. R.; COSCIONE, A. R.; FILHO, M. C. M. T.; MIRANDA, B. G.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; CARVALHO OLIVEIRA, F.; MOREIRA, A.; SHINTATE GALINDO, F.; SARTORI, M. P.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted sewage sludge enhances soybean production and agronomic performance in naturally infertile soils (Cerrado Region, Brazil). **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 11, p. 1677, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1677>. Acesso em: 24 abr. 2023.

PRATES, A. R.; KAWAKAMI, K. C.; COSCIONE, A. R.; FILHO, M. C. M. T.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted sewage sludge sustains high maize productivity on an infertile oxisol in the Brazilian cerrado. **Land**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1246, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/8/1246>. Acesso em: 24 abr. 2023.

R, C. T. **A language and environment for statistical computing**: R Foundation for Statistical Computing. Viena, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 24 abr. 2023.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RANGEL, T. S.; SANTANA, N. A.; JACQUES, R. J. S.; RAMOS, R. F.; SCHEID, D. L.; KOPPE, E.; TABALDI, L. A.; OLIVEIRA SILVEIRA, A. Organic fertilization and mycorrhization increase copper phytoremediation by *Canavalia ensiformis* in a sandy soil. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 30, n. 26, p. 68271-68289, 1 jun. 2023.

ROSA, P. A. L.; MORTINHO, E. S.; JALAL, A.; GALINDO, F. S.; BUZETTI, S.; FERNANDES, G. C.; BARCO NETO, M.; PAVINATO, P. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Inoculation with growth-promoting bacteria associated with the reduction of phosphate fertilization in sugarcane. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 8, 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. Á. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J.

B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF: **Embrapa Solos**, 2018.

SHARMA, S.; DHALIWAL, S. S. Effect of sewage sludge and rice straw compost on yield, micronutrient availability and soil quality under Rice-Wheat system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 50, n. 16, p. 1943-1954, 8 set. 2019.

SILVA, A. T. S.; SILVA, L. D. R.; JUNIOR, W. S.; NASCIMENTO, M. A.; MIELEZRSKI, F.; SILVA, T. L. Desenvolvimento da cana-de-açúcar em função da época de adubação. **Meio Ambiente**, São Paulo, v. 4, n. 4, 27 out. 2022.

SILVA, G. DA; PRADO, R. Estado nutricional da cana-de-açúcar em função da aplicação de nitrogênio e silício. **Acta Tecnológica**, São Luís, v. 15, p. 27, 19 mar. 2021.

SILVA, L. S.; JÚNIOR, J. M.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**, Amsterdam, v. 185, p. 104258, 1 fev. 2020.

SILVA; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; SOUZA, A. A. B.; FRACETTO, G. G. M.; XIMENES, D. H. S. V. Effects of sewage sludge stabilization processes on soil fertility, mineral composition, and grain yield of maize in successive cropping. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 21, n. 2, p. 1076-1088, 1 jun. 2021.

SILVA, R. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N.; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; FILHO, M. C. M. T.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted sewage sludge application reduces mineral fertilization requirements and improves soil fertility in sugarcane seedling nurseries. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, p. 4684, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4684>. Acesso em: 24 abr. 2023.

SINGH, P. K.; AG, D. D.; BD, D. B.; AM, D. N.; US, D. S.; VS, W. Effect of urban compost on yield of seasonal-sugarcane in Vertic inceptisol. **The Pharma Innovation**, New Delhi, v. 12. 2023. Disponível em: <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2023&vol=12&issue=1&ArticleId=18156>. Acesso em: 24 abr. 2023.

SOUZA, A. A. B.; RAMOS, W. S.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; SILVA, Y. J. A. B. DA; BIONDI, C. M. Residual effects of alkalized sewage sludge application on soil quality and sugarcane yield. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxfordshire, v. 0, n. 0, p. 1-13, 1 ago. 2022.

TERA, A. **Lodo de esgoto**: de resíduo a fertilizante orgânico. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/lodo-de-esgoto-residuo-a-fertilizante-organico>. Acesso em: 29 abr. 2023.

TITOVA, J.; BALTRÉNAITĖ, E. Physical and chemical properties of biochar produced from sewage sludge compost and plants biomass, fertilized with that compost, important for soil improvement. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 12, n. 7, p. 3781-3800, 1 jul. 2021.

VASCONCELLOS, G.; LOPES, E. C.; SCHEUER, L. Informational flow of logistics processes: study on the process of fertilizer importation to Brazil. **International Journal for Innovation Education and Research**, Bhopal, v. 7, n. 10, p. 123-132, 1 out. 2019.

VASCONCELOS, R. L.; CREMASCO, C. P.; ALMEIDA, H. J. DE; GARCIA, A.; NETO, A. B.; MAUAD, M.; FILHO, L. R. A. G. Multivariate Behavior of Irrigated Sugarcane with Phosphate Fertilizer and Filter Cake Management: Nutritional State, Biometry, and Agroindustrial Performance. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 20, n. 4, p. 1625-1636, 1 dez. 2020.

VIJAYAKUMAR, M.; THIRUNAVUKKARASU, M.; P, R. D.; IAN. Enhancement of sugarcane productivity through STCR based balanced fertilization. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Kancheepuram, v. 9, n. 5, p. 3433-3449, 10 mai. 2020.

VINCIGUERRA, T. C.; SZYMCAK, D. A.; PRADO, N. V. Produção de mudas de Bauhinia forficata link com adição de lodo de esgoto compostado. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 16, n. 1, p. 1-13, 10 fev. 2023.

VINHA, A. P. C.; CARRARA, B. H.; SOUZA, E. F. S.; SANTOS, J. A. F.; ARANTES, S. A. C. M. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, Sinop, v. 9, n. 1, p. 30-35, 10 fev. 2021.

WANDERLEY, L. R. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS, R. L. DOS. Nutritional Requirement by Irrigated Brazilian Sugarcane Varieties. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 23, n. 4, p. 762-775, 1 ago. 2021.

ZHAO, Y.; CAO, J.; WANG, Z.; LIU, L.; YAN, M.; ZHONG, N.; ZHAO, P. Enhancing sugarcane growth and improving soil quality by using a network-structured fertilizer synergist. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 2, p. 1428, jan. 2023.

3 ESTADO NUTRICIONAL, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR ADUBADA COM COMPOSTO DE LODO DE ESGOTO E FERTILIZANTES MINERAIS

RESUMO

O desempenho produtivo e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar estão relacionados ao manejo nutricional. Por essa razão, há grande preocupação em garantir a disponibilidade de nutrientes via adubação mineral. Por outro lado, no setor sucroenergético, tem crescido a procura por fontes alternativas para viabilizar a adubação orgânica e otimizar e até mesmo reduzir a adubação mineral. Desse modo, a aplicação do composto de lodo de esgoto (CLE) vem sendo pesquisada, mas ainda faltam informações que evidenciem a viabilidade do fornecimento deste fertilizante com possíveis reduções no uso de fertilizantes minerais, em especial, no cultivo da cana-de-açúcar. Para tanto, elaborou-se o presente estudo, com o objetivo de avaliar o estado nutricional, a produtividade e a qualidade tecnológica ($^{\circ}$ Brix, ATR, TAH e POL) após a aplicação do CLE associado ou não a adubação mineral convencional (AMC) em um sistema de cultivo de cana-de-açúcar (1ª e 2ª soca). Adotou-se o delineamento em bloco casualizados, com 11 tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos avaliados na 1ª soca foram: T1 – controle absoluto; T2: 100% da AMC NPK (20–00–20); doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE = T3: 2,5; T4: 5,0; T5: 7,5; doses ($t\ ha^{-1}$, base úmida) de CLE + AMC com NPK ($kg\ ha^{-1}$) = T6: 2,5 + 50%; T7: 5,0 + 50%; T8: 7,5 + 50%; T9: 2,5 + 100%; T10: 5,0 + 100%; T11: 7,5 + 100%. Na 2ª soqueira, não foram aplicadas as doses de CLE, porém, aplicou-se apenas os fertilizantes minerais nas mesmas proporções para cada tratamento. As doses $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE (T4) e $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE + AMC 50% (T7) promoveram o incremento da produtividade ($t\ de\ cana\ ha^{-1}$) e dos teores foliares de N, P, Ca, Mg, B e Zn nas duas soqueiras. As melhores produtividades puderam ser observadas nos tratamentos T4 e T9 para TCH e TAH. Os resultados encontrados evidenciam que o CLE foi capaz de fornecer os nutrientes necessários para o desenvolvimento vegetativo e produtividade como fertilizante orgânico na cultura da cana-de-açúcar é, podendo até reduzir a adubação mineral.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum* L; adubação orgânica; fertilizantes; nutrição de plantas; sustentabilidade.

NUTRITIONAL STATUS, PRODUCTIVITY, AND TECHNOLOGICAL QUALITY OF SUGARCANE FERTILIZED WITH COMPOSTED SEWAGE SLUDGE AND MINERAL FERTILIZERS

ABSTRACT

The productive performance and technological quality of sugarcane are closely related to nutritional management. Therefore, there is significant concern in ensuring the availability of nutrients through mineral fertilization. Conversely, the sugar-energy sector has seen a growing demand for alternative sources to facilitate organic fertilization and optimize or even reduce mineral fertilization. Thus, the application of composted sewage sludge (CSS) has been researched, but there is still a lack of information demonstrating the viability of supplying these fertilizers with possible reductions in the use of mineral fertilizers, especially in sugarcane cultivation. This study was conducted with the objective of evaluating the nutritional status, productivity, and technological quality (°Brix, ATR, TAH, and POL) after the application of CSS, either associated with or without conventional mineral fertilization (CMF) in a sugarcane cultivation system (first and second ratoon). The experimental design was a randomized complete block design with 11 treatments and four replicates. The treatments evaluated in the first ratoon were: T1 – control; T2: 100% of CMF NPK (20–00–20); CSS application rates (Mg ha^{-1} , wet basis) = T3: 2.5; T4: 5.0; T5: 7.5; CSS rates (Mg ha^{-1} , wet basis) + CMF with NPK (kg ha^{-1}) = T6: 2.5 + 50%; T7: 5.0 + 50%; T8: 7.5 + 50%; T9: 2.5 + 100%; T10: 5.0 + 100%; T11: 7.5 + 100%. In the second ratoon, only mineral fertilizers were applied in the same proportions for each treatment. The treatments with 5.0 Mg ha^{-1} CSS (T4) and 5.0 Mg ha^{-1} SSC + 50% CMF (T7) promoted increases in sugarcane productivity and the leaf N, P, Ca, Mg, B, and Zn concentration in both the first and second ratoon. The best productivity was observed in treatments T4 and T9 for TCH and TAH. It is concluded that the use of CSS as an organic fertilizer in sugarcane cultivation can provide the nutrients for vegetative development and productivity, potentially reducing the need for mineral fertilization.

Keywords: *Saccharum officinarum* L. organic fertilization. fertilizers. plant nutrition sustainability.

3.1 INTRODUÇÃO

A adubação é uma prática agronômica fundamental para garantir o crescimento e consequentemente a produtividade das culturas agrícolas (Nicchio *et al.*, 2020; Silva, 2020; Floriano, 2022). Para a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), uma das culturas mais importantes do Brasil, tanto em termos econômicos quanto em termos de produção de bioenergia, a escolha da adubação adequada pode impactar significativamente a eficiência produtiva e a qualidade dos produtos (Santos *et al.*, 2019; EMBRAPA, 2022; Guerra, 2023b). Entre as alternativas de adubação que tem ganho destaque, está o uso do composto de lodo de esgoto (CLE), fertilizante orgânico que oferece uma série de benefícios em relação a adubação convencional (Moretti, Bertoncini e Abreu Junior, 2015; Balaganesh *et al.*, 2020).

O CLE é um produto oriundo da compostagem de lodo de esgoto sanitário que é gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), rico em matéria orgânica, N, P e alguns micronutrientes (Araújo *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022). Sua aplicação no solo pode promover uma liberação gradual desses elementos, o que é benéfico para o desenvolvimento das plantas, proporcionando um fornecimento contínuo e equilibrado desses nutrientes ao longo do ciclo de cultivo (Prates *et al.*, 2022b; Silva *et al.*, 2021).

A adubação com CLE pode melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo, o que se reflete em um crescimento radicular mais robusto e uma maior absorção de nutrientes pelas plantas (Burducea *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021). Estudos indicam que o uso de CLE pode aumentar o teor de macro e micronutrientes nas folhas e caules da cana-de-açúcar, promovendo um crescimento vegetativo mais vigoroso e um desenvolvimento mais equilibrado da planta (Balaganesh *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023, 2022b). Essa melhoria nutricional é essencial para sustentar altas taxas de fotossíntese e, consequentemente, uma maior produção de biomassa (Bhatt, 2020; Boschiero *et al.*, 2020; Gabira *et al.*, 2021; Verma *et al.*, 2020).

Em termos de desempenho produtivo, a utilização do CLE tem apresentado resultados promissores. Diversos experimentos de campo demonstraram que a aplicação de CLE pode levar a um aumento significativo na produtividade da cana-de-açúcar, tanto em termos de toneladas por hectare quanto em relação ao teor de sacarose nas plantas (Silva *et al.*, 2020; Gonçalves *et al.*, 2021; Souza, Silva *et al.*, 2023). Tal incremento na produtividade e qualidade tecnológica se deve ao fato de que o CLE contribui para a melhoria da estrutura do solo, aumentando sua capacidade

de retenção de água, nutrientes e atividade microbiana. A presença de uma microbiota ativa e diversificada pode também induzir a produção de hormônios de crescimento vegetal, que contribuem para um desenvolvimento mais equilibrado e produtivo da cana-de-açúcar (Berg *et al.*, 2020; Boudjabi e Chenchouni, 2021; Niu *et al.*, 2021; Tayyab *et al.*, 2021).

A qualidade tecnológica dos produtos derivados da cana-de-açúcar, como o açúcar e o etanol, também pode ser influenciada pela adubação orgânica (Sinha *et al.*, 2024). A presença de matéria orgânica (MO) e nutrientes específicos no solo pode afetar a composição química da cana, resultando em um teor de sacarose mais elevado e em uma melhor qualidade do caldo extraído (Li *et al.*, 2020; Volverás-Mambuscay *et al.*, 2020). Entretanto, é crucial que o uso do CLE seja realizado de acordo com as normas e regulamentações estabelecidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A classificação do CLE como fertilidade orgânico classe B pela normativa nº 61 do MAPA garante que este composto é seguro para uso agrícola, apresentando baixos níveis de contaminantes e patógenos (Brasil, 2020a;b).

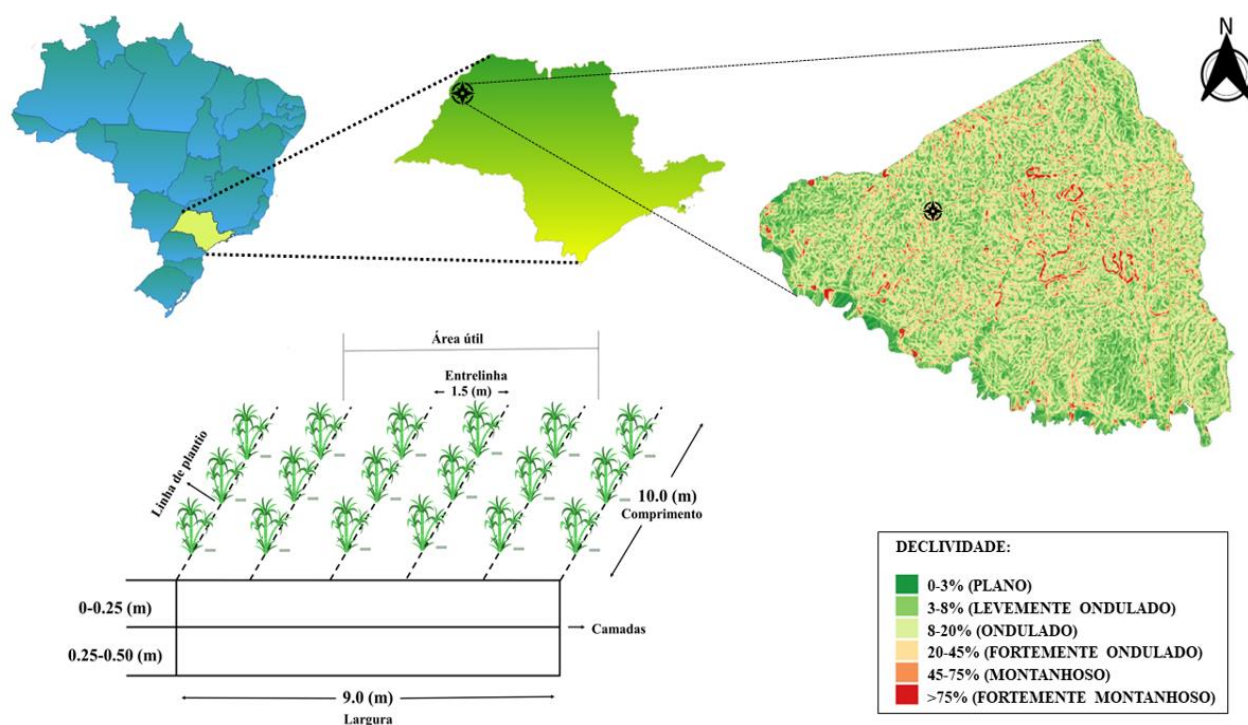
Embora o CLE seja utilizado como adubo orgânico na cultura da cana-de-açúcar, há poucos estudos conclusivos sobre os impactos de suas sucessivas aplicações. A maioria das pesquisas foca apenas na avaliação inicial do lodo de esgoto, sem considerar os efeitos a longo prazo do uso contínuo do CLE. Além disso, o desempenho nutricional e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob repetidas aplicações de CLE ainda não são bem compreendidos.

Dessa forma, temos como hipótese de que a adubação com CLE associada ou não a adubação mineral convencional, inclusive seu efeito residual, representa uma alternativa sustentável e eficaz para melhorar a fertilidade do solo, promover o desempenho nutricional e produtivo, e aprimorar a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Por essa razão, objetivou-se com esse estudo, avaliar o desempenho produtivo ($t\ ha^{-1}$ de cana), o estado nutricional (teores foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) e a qualidade tecnológica (toneladas de açúcar por hectare - TAH, ATR, Brix e POL) ao longo de duas safras consecutivas na cultura da cana-de-açúcar, sendo utilizado a 1ª e 2ª soca de um sistema comercial de produção.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de campo em dois anos agrícolas (2020/2021 e 2021/2022) no município de Suzanápolis, São Paulo, Brasil (20°28'47.40"S e 51° 4'33.14"O. A região possui altitude de 354 m acima do nível do mar (Figura 9).

Figura 9 - Localização da área experimental (município de Suzanápolis, São Paulo, Brasil) e representação esquemática de uma única parcela com a individuação da "área útil" para coleta de dados do solo e da planta



Fonte: Do próprio autor

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico, textura arenosa (Santos *et al.*, 2018). A implantação foi realizada em uma área comercial com a cultura de cana-de-açúcar. Amostras do solo foram coletadas antes da instalação do experimento, nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade, para realizar a caracterização física e química do solo (Tabela 4).

Tabela 4 - Atributos físicos e químicos das amostras de solo coletadas na área experimental nas camadas de 0,00–0,25 e 0,25–0,50 m de profundidade (média ± desvio padrão, n = 3).

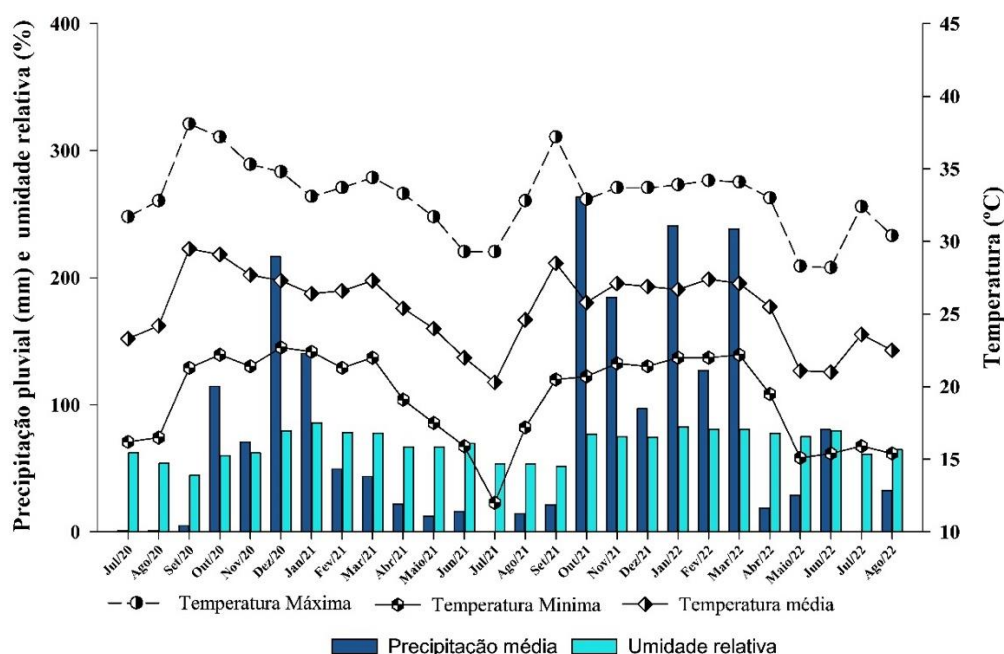
Camadas	pH _(CaCl2)	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC
m		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³						
0,00–0,25	5,2±0,1	13±0,5	1,3±0,5	1,2±0,1	16±5,2	9±0,4	0,7±0,9	16,7±2,3	25,5±5,5	42,2±4,2
0,25–0,50	5,1±0,1	12±0,8	2,7±1,7	1,2±0,1	17±5,4	11±0,4	1,7±1,2	16,0±1,4	29,2±5,7	45,2±4,9
Camadas	V	S-SO ₄	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila
m	%	mg dm ⁻³						g kg ⁻¹		
0,00–0,25	60±7,8	2,0±0,0	0,2±0,0	1,1±0,1	13±17,4	12±3,0	0,6±0,0	779,0±39,0	87,0±16,0	134,0±23,0
0,25–0,50	64±5,7	2,3±0,4	0,1±0,1	1,3±0,1	16±21,2	7,9±1,8	0,6±0,1			

Fonte: Do próprio autor

^aTeixeira et al. (2017). ^bRaij et al. (2001). MO: Matéria orgânica do solo. CTC: Capacidade de troca catiônica. SB: Soma de bases. V: Saturação por bases.

O tipo climático da região é o Aw (chuva máxima na primavera/verão, inverno seco e chuva periódica) conforme a classificação de Köppen e Geiger (1928). Os dados climatológicos mensais foram coletados ao longo do estudo (Figura 10).

Figura 10 - Médias mensais da precipitação pluvial (mm), da umidade relativa do ar (%) e da temperatura (°C) máxima, média e mínima registradas durante o cultivo da cana-de-açúcar. Dados coletados da estação climática da Faculdade de Engenharia da Unesp, Ilha Solteira



Fonte: Do próprio autor

3.1.1 Delineamento experimental e tratamentos

Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com 11 tratamentos e quatro repetições, totalizando 44 unidades experimentais. Os tratamentos utilizados no primeiro ano do experimento (1ª soca – safra 2020/2021), consistiram em diferentes aplicações de doses de CLE (base úmida) e de adubo mineral NPK (formulação 20–00–20). No segundo ano (2ª soca – 2021/2022), o experimento foi conduzido novamente no mesmo local, preservando-se as mesmas localizações das parcelas utilizadas no ano anterior. No entanto, neste ano, não foram aplicadas doses de CLE. Em vez disso, foram aplicadas apenas adubações de cobertura mineral NPK (formulação: 20-00-20). O intuito dessa abordagem foi avaliar o efeito residual da aplicação das doses de CLE realizada no primeiro ano do experimento. Considerou-se a proporção de 1,0 kg ha⁻¹ de N e K₂O por tonelada de

cana, metodologia utilizada na produção de cana soca comercial na empresa que sediou a instalação do experimento. Os tratamentos utilizados nos dois anos estão detalhados na tabela 5.

Tabela 5 - Composição dos tratamentos estudados na presente pesquisa

Tratamentos	2019/20	2020/21	2021/22
	Cana planta	1ª Soca	2ª Soca
T1	CLE 0,0 t ha ⁻¹ + AMC 0%	CLE 0,0 t ha ⁻¹ + AMC 0%	CLE 0,0 t ha ⁻¹ + AMC 0%
T2	100% AMC ¹	100% AMC ²	100% AMC ³
T3	CLE 2,5 ha ⁻¹	CLE 2,5 ha ⁻¹	-
T4	CLE 5,0 ha ⁻¹	CLE 5,0 ha ⁻¹	-
T5	CLE 7,5 ha ⁻¹	CLE 7,5 ha ⁻¹	-
T6	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	AMC 50%
T7	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 50%	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 50%	AMC 50%
T8	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 50%	AMC 50%
T9	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	CLE 2,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	AMC 100%
T10	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 100%	CLE 5,0 ha ⁻¹ + AMC 100%	AMC 100%
T11	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	CLE 7,5 ha ⁻¹ + AMC 100%	AMC 100%

Fonte: Do próprio autor

Nota: ¹ AMC NPK (06–30–24), sendo: 33 kg ha⁻¹ de N, 165 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 132 kg ha⁻¹ de K₂O. ² AMC NPK (20–00–20), sendo: 90 kg ha⁻¹ de N e 90 kg ha⁻¹ de K₂O. ³ AMC NPK (20–00–20), sendo: 75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O. CLE: Composto de lodo de esgoto. AMC: Adubação mineral convencional.

3.1.2 Caracterização do composto de lodo de esgoto

O CLE foi fornecido pela empresa Tera Ambiental Ltda, localizada em Jundiaí, SP, Brasil. Trata-se de um fertilizante orgânico composto Classe B já registrado junto ao MAPA (Brasil, 2020a). O CLE é produzido a partir da compostagem de resíduos orgânicos urbanos diversos, como lodo de esgoto sanitário, resíduos orgânicos urbanos e agroindustriais tais como bagaços, cascas de frutas e legumes provenientes do processamento de alimentos, cama de aviário e cavaco de madeira. Na obtenção do CLE, os compostos orgânicos sofrem decomposição e estabilização biológica por meio da compostagem termofílica, com temperatura acima dos 60 °C, tornando-o completamente higienizado, posteriormente o produto passa pelo processo de peneiramento e empilhamento, fase essencial para a maturação do composto num período de aproximadamente duas semanas. Após essa etapa o

fertilizante orgânico estará pronto para o uso, o produto possui cerca de 40% de umidade. O composto foi caracterizado seguindo as recomendações preconizadas na Resolução no 375/2006 (Brasil 2006), sendo considerado apropriado para uso neste estudo conforme a composição química e microbiológica descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química e microbiológica de amostras do composto de lodo de esgoto

Característica	Unidade	Valor obtido	Valor permitido ^(a)
<i>Química</i>			
pH (CaCl ₂)	-	7,9 ± 0,4	-- ^(b)
Umidade (60–65 °C)	%	33,9 ± 1,4	--
Umidade Total	%	35,1 ± 1,5	--
Matéria orgânica Total (Combustão)	g kg ⁻¹	230,4 ± 8,3	--
Carbono orgânico	g kg ⁻¹	111,1 ± 14,8	--
CTC	mmol _c dm ⁻³	250,3 ± 4,6	--
C/N	-	11,0 ± 1,7	--
Nitrogênio Total	g kg ⁻¹	10,5 ± 1,8	--
Fósforo Total	g kg ⁻¹	13,2 ± 3,9	--
Enxofre Total	g kg ⁻¹	6,2 ± 0,4	--
Magnésio	g kg ⁻¹	9,5 ± 2,3	--
Potássio	g kg ⁻¹	8,0 ± 1,0	--
Cálcio	g kg ⁻¹	30,6 ± 3,4	--
Arsênio	mg kg ⁻¹	6,4 ± 2,3	20
Boro	mg kg ⁻¹	17,6 ± 6,0	--
Cádmio	mg kg ⁻¹	0,9 ± 0,3	3
Cobre	mg kg ⁻¹	178,0 ± 61,9	--
Chumbo	mg kg ⁻¹	17,8 ± 10,1	150
Cromo	mg kg ⁻¹	65,7 ± 46,2	--
Ferro	mg kg ⁻¹	18207 ± 788,1	--
Manganês	mg kg ⁻¹	435,0 ± 208,0	--
Mercúrio	mg kg ⁻¹	0,3 ± 0,1	1
Molibdênio	mg kg ⁻¹	6,0 ± 3,4	--
Níquel	mg kg ⁻¹	30,1 ± 3,4	70
Zinco	mg kg ⁻¹	1083 ± 339,5	--
<i>Microbiológica</i>			
<i>Salmonella</i> sp.	NMP/10g	Ausente	--
Coliformes Termotolerantes	NMP/g	0	--
Ovos Viáveis de Helmintos	Ovos/g de ST	0,1	--

Fonte: Do próprio autor

^aInstrução Normativa n° 7 MAPA (2020). ^bNão determinado. NMP: Número mais provável.

3.1.3 Histórico do experimento e desenvolvimento da cultura

O preparo inicial da área experimental foi realizado em novembro de 2019, época em que foi realizado o manejo das plantas invasoras via dessecação com glifosato na dose de $3,1 \text{ kg ha}^{-1}$ do i.a. Com base nos resultados da avaliação da fertilidade do solo (Tabela 2), foi realizada a aplicação de calcário agrícola (PRNT=85) ($0,5 \text{ t ha}^{-1}$) de forma mecanizada em área total, objetivando elevar a saturação por bases a 70% e, em seguida, aplicação de $0,7 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso agrícola de forma mecanizada em área total (Cantarella *et al.*, 2022). Foi realizada uma gradagem pesada, seguida de uma grade intermediária e subsolagem nas profundidades 0,30, 0,25 e 0,45 m, respectivamente, com aplicação de inseticida imidacloprido $1,2 \text{ kg ha}^{-1}$ do i.a. O CLE e o AMC utilizados em cada tratamento foram aplicados manualmente no sulco no momento do plantio em cada unidade experimental.

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado de maneira semimecanizada, utilizando um total de $14,26 \text{ t ha}^{-1}$ de muda de cana. Utilizou-se como planta-teste a variedade de cana-de-açúcar RB867515. Trata-se da variedade de cana mais plantada no Brasil, com bom desenvolvimento vegetativo, alto índice produtivo e alto teor de açúcar (Daros *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2021). A profundidade do sulco para a realização do plantio foi de aproximadamente 0,35 m e as mudas foram posicionadas no fundo do sulco com uma proporção de 22 gemas viáveis por metro. Cada parcela experimental compreendeu em seis linhas da cultura de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,50 m entre si e com 10 m de comprimento, totalizando 90 m^2 por parcela e 3.960 m^2 de área total. A área útil da parcela para as avaliações foi constituída pelas três linhas centrais, sendo eliminados como bordadura 1,0 m de cada extremidade, totalizando 36 m^2 .

Logo após a colheita da cana planta, em agosto 2020, foi realizado a aplicação de herbicida em pré-emergência com diuron $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ do i.a e s-metolaclopro 2,2 L ha^{-1} do i.a. para controlar o banco de sementes das plantas invasoras. Devido ao efeito residual das aplicações de calcário e gesso agrícola realizadas no plantio, não foi necessário reaplicar esses insumos no segundo ano agrícola. A reaplicação desses insumos foi realizada apenas no 3º ano agrícola, sendo aplicado $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso e calcário agrícola (PRNT=85) (Cantarella *et al.*, 2022). Aos 60 dias após a colheita (outubro de 2020), foi realizada na 1ª soca a aplicação do CLE e dos fertilizantes

minerais. Na 2ª soca (novembro de 2021), aplicou-se apenas os fertilizantes minerais (Tabela 1). O CLE e os fertilizantes minerais foram distribuídos manualmente sobre a linha do cultivo, sem incorporação.

A área experimental não foi irrigada, contando apenas com a precipitação pluviométrica ocorrida na região na época do estudo. A colheita do experimento para a 1ª soca foi realizada mediante o corte manual em agosto de 2021, quando a cultura possuía 12,1 meses de idade. Já para a 2ª soca, a colheita foi realizada em julho de 2022, quando a cana possuía 11,5 meses de idade. Em ambos os ciclos foram colhidas apenas as três linhas centrais (área útil) de cada parcela.

3.1.4 Análise dos teores de nutrientes, análise tecnológica e produtividade

No quinto mês de cada ciclo sendo janeiro de 2021 para a 1ª soca e fevereiro de 2022 para 2ª soca, foram coletadas 10 folhas por unidade experimental, retirando os 20 cm centrais da folha + 1 (folha mais alta com colarinho visível - "TVD"), excluindo a nervura central (Raij, 2011) para, posteriormente, realizar as determinações dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

A produtividade de colmos da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) foi obtida considerando o peso total dos colmos, retirados na área útil das parcelas, sendo colhidos apenas os três sulcos centrais de cada parcela, para as duas safras.

Também dentro da área útil de cada unidade experimental, foram colhidos 10 colmos por metro, para realização das avaliações das características tecnológicas por meio da determinação do Brix% caldo, do açúcar total recuperável (ATR, $kg\ ha^{-1}$) e da percentagem de sacarose da cana (Pol, % cana), quantificados conforme o CONSECAN (2006). Também, foram calculados a produtividade de açúcar, em toneladas de açúcar por hectare (TAH, $t\ ha^{-1}$), mediante o produto do ART pelo TCH, dividido por 1000.

3.1.5 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise da variância (ANOVA), sendo as médias agrupadas pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$) para as variáveis qualitativas. Para os tratamentos com aplicação de doses CLE, foi realizada análise de regressão polinomial. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa AgroEstat (Barbosa e Júnior 2015) e do software R (R Core Team 2023).

3.1.6 Resultados e discussão

Na 1ª soca, os teores foliares de N variaram de 18,7 g kg⁻¹ (T1) a 20,8 g kg⁻¹ (T4). Na 2ª soca, os teores de N encontrados nas folhas variaram de 17,0 g kg⁻¹ (T1) a 20,2 g kg⁻¹ (T4), respectivamente. Exceto para os tratamentos T1 e T3 (controle e 2,5 t ha⁻¹ de CLE) na 2ª soca, em ambos os anos, os teores de N eram considerados adequados (18–25 g kg⁻¹) conforme os teores estabelecidos na faixa de suficiência proposta por Cantarella et al. (2022), evidenciando eficácia dos tratamentos que foram capazes de fornecer N para a cultura, mantendo o estado nutricional adequado (Figura 11a). O tratamento T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE), apresentou o maior teor de N foliar (20,84 g kg⁻¹). Este teor foi significativamente superior (10%) aos demais tratamentos, incluindo o T1 (controle) e T2 (100% AMC) (Figura 11a).

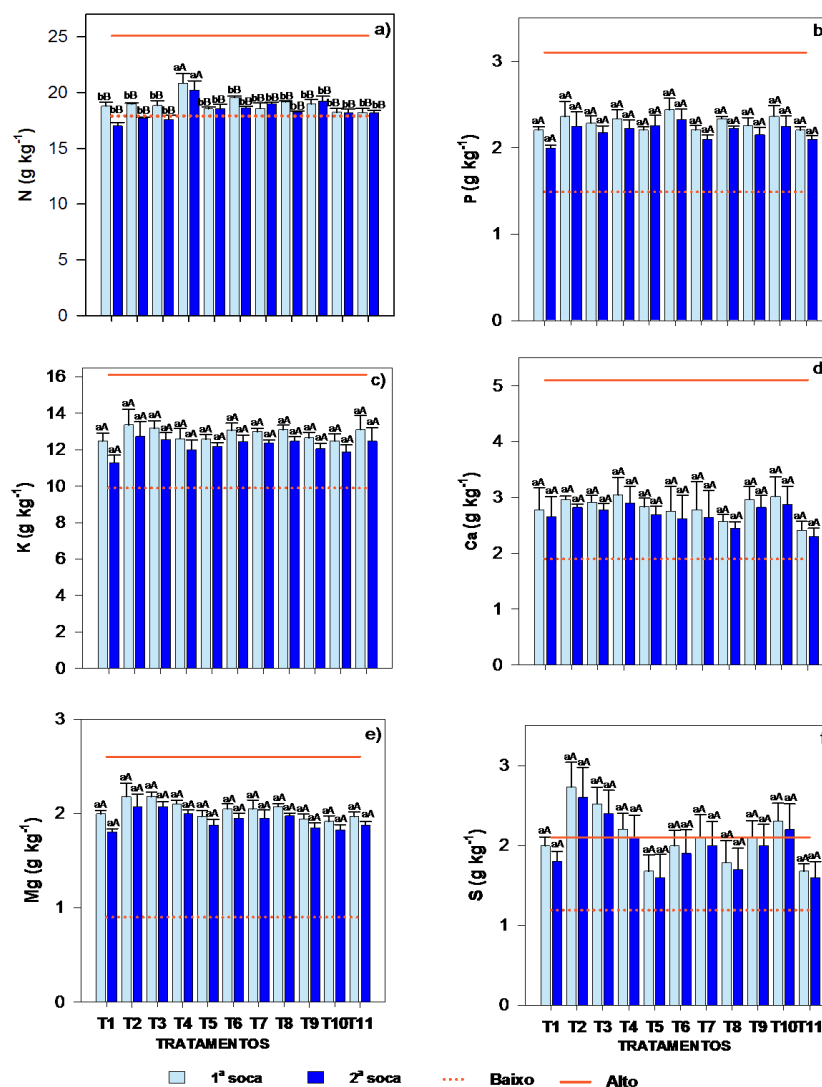
Os tratamentos T1, T2, T3 e T5 apresentaram teores de N foliar menores e estatisticamente semelhantes entre si, embora todos estivessem dentro do intervalo adequado, em ambos os anos (Figura 11a). A similaridade entre T1 e os tratamentos com doses mais baixas de CLE (T3 e T5) pode indicar que tais doses não foram suficientes para promover uma absorção significativamente maior de N em comparação ao controle. A redução nos teores de N foliar na 2ª soca, pode ser atribuída a fatores climáticos, como o baixo volume pluviométrico (Figura 10).

Por outro lado, avaliando apenas o efeito da aplicação das doses de CLE (variando de 0 a 7,5 t ha⁻¹, base úmida) sobre os teores de nutrientes foliar na 1ª e 2ª soca, observou-se um aumento na concentração de N até a dose de 5,0 t ha⁻¹, que apresenta a maior mediana e maior dispersão dos valores. Já para a 2ª soca, o efeito residual mostrou-se positivo, isso indica que o efeito benéfico do CLE se prolonga para o segundo ciclo de cultivo, mantendo uma alta absorção de N, especialmente na dose de 5,0 t ha⁻¹ mostrou significativo maior efeito positivo na concentração de N, o que evidencia um efeito residual positivo do CLE. Já na dose de 7,5 t ha⁻¹, a concentração de N decresce novamente, sugerindo que, mesmo no segundo ano, doses elevadas podem não mostrar a mesma resposta (Figura 15).

Não houve diferença entre os tratamentos ao longo das duas safras estudadas para os teores de P nas folhas (Figura 11b). Todos os teores estavam dentro do intervalo considerado adequado para a cultura (1,5–3,0 g kg⁻¹) (Cantarella et al., 2022). Na 1ª soca, o T2 (100% AMC) apresentou o maior teor foliar de P (2,3 g kg⁻¹),

seguido pelos tratamentos com 5,0 t ha⁻¹ de CLE (T4) e 2,5 t ha⁻¹ de CLE (T3), com teores foliares de 2,4 g kg⁻¹ e 2,3 g kg⁻¹, respectivamente.

Figura 11 - Teor de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na folha diagnose da cultura da cana-de-açúcar em resposta aos tratamentos e anos de cultivo



Nota: **1ª soca**: T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca**: T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O), T3 = Residual de (R) 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, *n* = 4). As linhas representam a faixa de interpretação de teores de macronutrientes para a cultura da cana-de-açúcar conforme descrito em Cantarella et al. (2022).

Os menores teores de P nas folhas puderam ser observados nos tratamentos T1 e T5, com teores abaixo de $2,2 \text{ g kg}^{-1}$. Na 2ª soca, o T1 apresentou a menor teor foliar de P ($1,9 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto o tratamento com $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE (T5) apresentou a maior teor desse nutriente ($2,3 \text{ g kg}^{-1}$). O fator que proporcionou maior teor de P no T5 na segunda safra, pode estar relacionado ao efeito residual da matéria orgânica aplicada no 1ª soca, que se tornou mais evidente, especialmente no tratamento com $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE, onde a mineralização contribuiu para a liberação contínua de P.

Os teores foliares de K, associado ou não aos fertilizantes minerais, estavam dentro do intervalo adequado ($10\text{--}16 \text{ g kg}^{-1}$) proposto por Cantarella et al. (2022) (Figura 11c). Tal efeito, indica que a adubação utilizada nos tratamentos, independentemente da fonte, foi eficaz em manter os níveis de K dentro dos padrões recomendados para a cana.

Analisando o efeito residual do CLE e a aplicação do AMC, observou-se que os teores foliares de K apresentaram uma leve redução de 10% ($12,54 \text{ g kg}^{-1}$) em todos os tratamentos, variando de 12 g kg^{-1} na 1ª soca para 11 g kg^{-1} na 2ª soca. Apesar dessa redução, todos os tratamentos ainda mantiveram os teores de K nas folhas dentro do intervalo adequado (Cantarella et al., 2022). A diminuição nos teores de K pode ser atribuída a fatores como a absorção contínua do nutriente pelo cultivo sem reposição suficiente, ou ainda, variações na disponibilidade hídrica que afetaram a disponibilidade de nutrientes no solo. Ademais, o K é um nutriente muito móvel no solo, podendo ser facilmente perdido.

Fica evidente que a adubação mineral foi eficaz para fornecer K em quantidades adequadas nas duas safras (Figura 11c). Mesmo sendo repostado na literatura que lodos de esgoto não fornecem K em quantidades suficientes para atender a demanda das culturas, neste estudo, os tratamentos com doses de CLE ($2,5$; $5,0$ e $7,5 \text{ t ha}^{-1}$) também apresentaram teores foliares de K adequados. Tais resultados podem ser explicados pela liberação gradual de K contida no CLE (Tabela 6).

Os teores de Ca nas folhas não apresentaram diferença em função dos tratamentos e dos anos estudados (Figura 11d). Ou seja, embora haja variações nos teores de Ca foliar, essas diferenças não foram estatisticamente significativas. Por outro lado, foi possível observar que os teores de Ca nas folhas, nas duas safras, eram considerados adequados ($2,0\text{--}5,0 \text{ g kg}^{-1}$) (Cantarella et al., 2022). A aplicação de calcário agrícola e gesso agrícola na 1ª e 2ª soca, juntamente com os teores de Ca

contidos no fertilizante orgânico (Tabela 6), contribuíram de forma eficiente para a manutenção dos teores adequados de Ca nas folhas.

Os teores de Mg variaram entre os tratamentos, sendo notado variação de 1,9 g kg⁻¹ (T9) a 2,1 g kg⁻¹ em T2 e T3 na 1ª soca (Figura 11e). Todos os tratamentos mantiveram os teores de Mg foliar dentro do intervalo adequado (1,0–2,5 g kg⁻¹) proposto por Cantarella et al. (2022). Na 1ª soca, o tratamento T2 (100% AMC) e T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) apresentaram os teores mais elevados, indicando que tanto a adubação mineral convencional quanto a aplicação de 2,5 t ha⁻¹ de CLE puderam fornecer Mg para as plantas de cana-de-açúcar. Já o T4 (5,0 ha⁻¹ de CLE) também mostrou um teor de Mg foliar alto, com 2,1 g kg⁻¹, muito próximo dos tratamentos T2 e T3, sugerindo a eficiência da disponibilidade de Mg foliar pelos tratamentos.

Por outro lado, os tratamentos com associação de CLE e AMC T10 (5,0 t ha⁻¹ + 100% AMC) e T11 (7,5 t ha⁻¹ + 100% AMC) apresentaram teores de Mg foliar menores, sendo 1,9 g kg⁻¹ e 2,0 g kg⁻¹, respectivamente. Essa redução pode ser atribuída ao estresse hídrico, que limita a solubilidade e o movimento dos nutrientes no solo, interferindo na absorção eficiente de magnésio pelas plantas. Para a segunda soca, os teores de Mg seguiram a mesma tendência, variando de 1,8 g kg⁻¹ (T1) a 2,1 g kg⁻¹ (T2 e T3). O efeito residual dos tratamentos T2 e T3 manteve os teores mais elevados de Mg foliar, corroborando os resultados do primeiro ano.

Analisando o efeito apenas das doses de CLE (0,0 a 7,5 t ha⁻¹) para a 1ª soca e o efeito residual destes na 2ª soca, observou-se que a dose de 2,5 t ha⁻¹ resulta na maior concentração de Mg nas folhas, com uma distribuição mais ampla. À medida que a dose aumenta para 5,0 e 7,5 t ha⁻¹, a concentração de Mg diminui, sugerindo que doses mais altas podem não ser eficientes ou até reduzir a absorção de Mg pelas plantas. O efeito residual do CLE também foi refletido da mesma dose ainda resultando na maior concentração (2,3 g kg⁻¹ de Mg), mesmo sem nova aplicação. A dose ótima de 3,75 t ha⁻¹ de CLE, calculada para a 1ª soca, pôde ser eficiente também no efeito residual, indicando que doses próximas a esse valor podem ser mais eficazes em ciclos subsequentes (Figura 16).

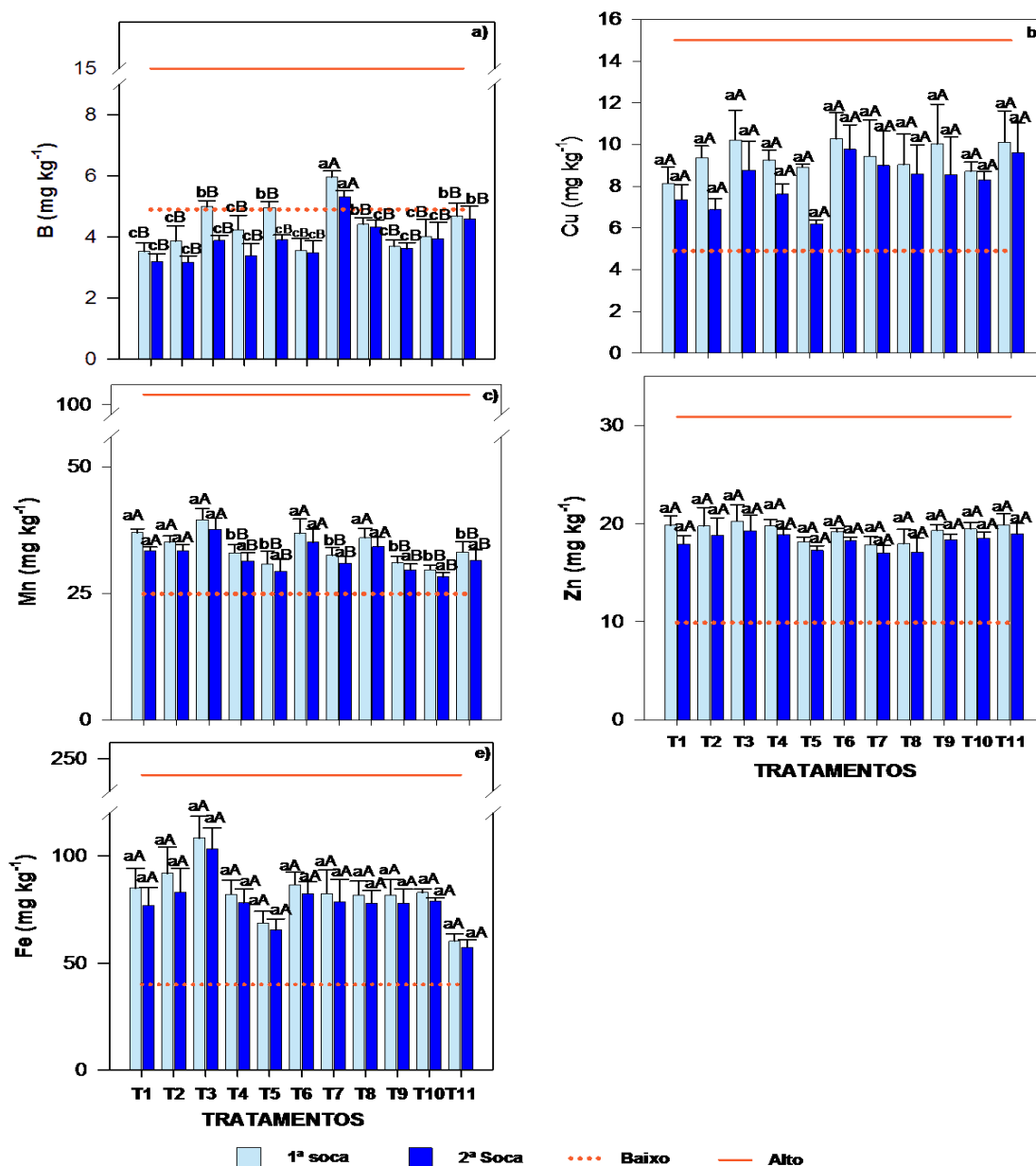
Não houve influência dos tratamentos em função dos anos, nos teores de S nas folhas da cana-de-açúcar (Figura 11f). Ainda assim, foi possível observar na 1ª soca a variação dos teores de S foliar de 1,6 g kg⁻¹ (T5 e T11) a 2,7 g kg⁻¹ (T2). Observa-se que todos os tratamentos mantiveram os teores de S dentro do intervalo adequado (1,2–2,0 g kg⁻¹) (Cantarella et al., 2022), exceto T5 (7,5 t ha⁻¹ de CLE) e T11

(7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% AMC). O tratamento T2 (100% AMC) apresentou o maior teor de S foliar, seguido por T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) e T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE). O S é absorvido pelas raízes das plantas principalmente na forma de sulfato (SO₄²⁻), a disponibilidade dos teores de S presente no T2 podem ter sido influenciados pela aplicação de gesso agrícola aplicados ao longo das duas safras, haja vista que a adubação mineral utilizada não contemplava teor de S em sua formulação.

Em relação aos micronutrientes, foi observado, nas duas soqueiras, que os maiores teores de B nas folhas foram obtidos (1ª soca = 6,0 mg kg⁻¹; 2ª soca = 5,9 mg kg⁻¹) no tratamento T7, ou seja, que recebeu a dose de 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% AMC (Figura 12a).

Os tratamentos T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE), T5 (7,5 t ha⁻¹ de CLE) e T11 (7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% AMC) apresentaram teores de B próximos do limite inferior do intervalo adequado (5–15 mg kg⁻¹) (Cantarella *et al.*, 2022), com teores de 4,8 mg kg⁻¹, 4,9 mg kg⁻¹ e 4,6 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 12a). Isso sugere que as doses de CLE estudadas, associado ou não a AMC, foram fontes de B, embora não tenham sido suficientes para alcançar o nível crítico em todos os casos na 1ª soca. Porém, quando foram analisadas as doses de 0 a 7,5 t ha⁻¹, foi possível observar ajuste quadrático para os teores de B foliar, principalmente na 2ª soca (Figura 17). A presença de MO no CLE pode melhorar a retenção de água e aumentar a disponibilidade de B para absorção pelas raízes. Observou-se o efeito residual do CLE no incremento dos teores de B no T7. Tal efeito indica a disponibilidade deste nutriente ao longo dos anos, Prates *et al.*, (2020) observaram maior disponibilidade de B nas folhas. O B é absorvido pelas raízes das plantas na forma de ácido bórico H₃BO₃. No CLE o B orgânico está ligado à MO, o que torna sua liberação gradual no solo e depende da concentração de boro na solução do solo, tal efeito pôde ser observado por Piazon Neto (2012).

Figura 12 - Teores de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e) na folha diagnose da cultura da cana-de-açúcar em resposta aos tratamentos e anos de cultivo



Fonte: Do próprio autor

Nota: **1ª soca**: T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca**: T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O), T3 = Residual de (R) 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, *n* = 4). As linhas representam a faixa de interpretação de teores de micronutrientes para a cultura da cana-de-açúcar conforme descrito em Cantarella et al. (2022).

Não houve influência dos tratamentos nos teores foliares de Cu nas duas safras (Figura 12b). Todavia, notou-se que as variações de 39% na 1ª soca, sendo o menor valor $6,1 \text{ mg kg}^{-1}$ e o maior $10,2 \text{ mg kg}^{-1}$, nos teores de Cu foliar entre os tratamentos. Isso indica que a adubação com doses intermediárias de CLE, especialmente, quando combinadas com AMC (T6 e T7), pôde disponibilizar este nutriente de maneira adequada (Figura 12b). Na 1ª soca, o T6 ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 50% AMC) apresentou o maior teor de Cu, seguido por T3 ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE) e T11 ($7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE + 100% AMC). Por outro lado, o T5 ($7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE) apresentou um teor do nutriente relativamente mais baixo, com $8,9 \text{ g kg}^{-1}$. Já na 2ª soca, os teores de Cu variaram de $6,2 \text{ g kg}^{-1}$ (T5) a $9,8 \text{ g kg}^{-1}$ (T6). Ainda assim, os teores de Cu nas folhas são considerados adequados no primeiro ano ($5\text{--}15 \text{ mg kg}^{-1}$) (Cantarella et al., 2022).

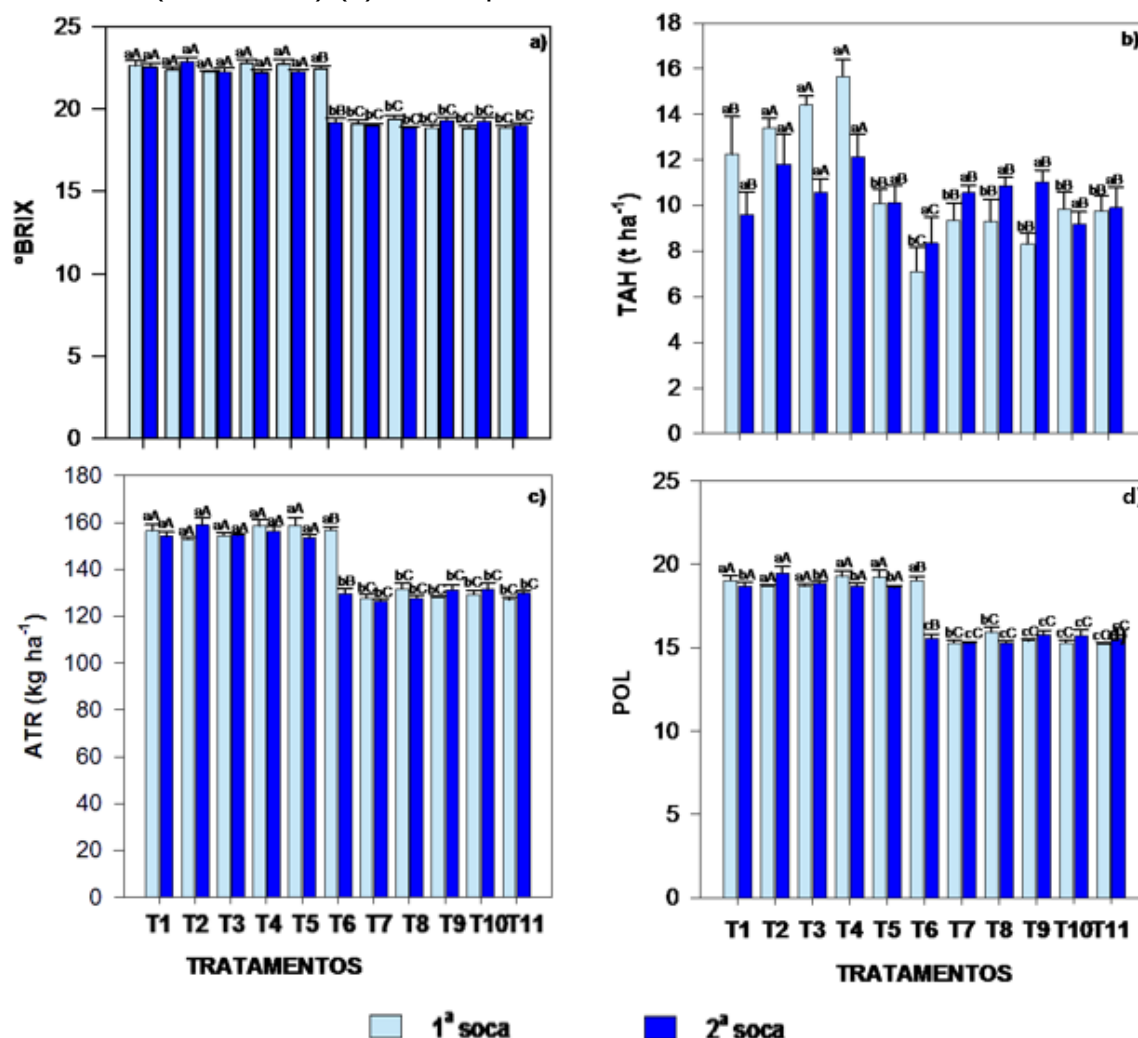
Os teores de Mn foliar variaram de $29,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (T10) a $39,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (T3) na 1ª soca (Figura 12c). Assim, em todos os tratamentos os teores de Mn nas folhas eram considerados adequados ($25\text{--}100 \text{ mg kg}^{-1}$) conforme estabelecido por Cantarella et al (2022) para a cana. O tratamento T3 ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE) apresentou o maior teor de Mn foliar, sugerindo que doses intermediárias de CLE são eficientes em fornecer Mn suficiente para as plantas. Por outro lado, os tratamentos T4 ($5,0 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE) e T5 ($7,5 \text{ t ha}^{-1}$ de CLE) apresentaram teores mais baixos de Mn. Para a 2ª soca, a disponibilidade de Mn manteve a tendência para os mesmos tratamentos (T3 e T10) com uma leve redução média de 4% ao ano. O T3 permaneceu com maiores teores de Mn ao longo das duas safras estudadas. Schmidt e Husted, (2019) relataram que tal efeito ocorreu devido à absorção do Mn pelo sistema radicular da cultura, principalmente, na forma de Mn^{2+} , que é a forma solúvel e disponível no solo. Após a aplicação de CLE, o Mn presente no composto é mineralizado pela atividade microbiana, transformando-se em Mn^{2+} . Em seguida, o nutriente é transportado pelo xilema até as folhas, onde desempenha funções essenciais na fotossíntese, na síntese de enzimas e na defesa contra estresses oxidativos (Khoshru et al., 2023)

Os teores de Fe e Zn nas folhas, não foram influenciados pelos tratamentos (Figuras 12d e 12e). Os teores de Fe nas folhas variaram de 60 mg kg^{-1} (T11) a 108 mg kg^{-1} (T3) na 1ª soca e de 57 mg kg^{-1} (T11) a 103 mg kg^{-1} (T3) na 2ª soca. Logo, pôde-se notar que esses teores estavam dentro dos intervalos ($45\text{--}250 \text{ mg kg}^{-1}$) considerados adequados para a cana (Cantarella et al., 2022). Na 1ª soca, os teores de Zn variaram de 18 mg kg^{-1} (T7) a 20 mg kg^{-1} (T3) e de 17 mg kg^{-1} (T7) a 19

mg kg⁻¹ (T4) para a 2ª soqueira. Esses teores também são considerados adequados (10–30 mg kg⁻¹) para a cana-de-açúcar (Cantarella et al., 2022). A diferença entre os teores de Fe na 1ª e 2ª soca pode ser atribuída ao efeito residual do CLE, que, ao ser decomposto, liberou Fe de maneira mais controlada. Segundo Mengel e Kirkby, (2001) essa liberação gradual pode ter evitado a precipitação de Fe em formas menos disponíveis, como Fe³⁺, especialmente em solos com pH mais elevado. O zinco (Zn) desempenha um papel fundamental como cofator de enzimas envolvidas na síntese de auxinas, na estabilidade das membranas celulares e na tolerância a estresses ambientais (Alloway, 2008). O CLE contribuiu para a manutenção dos teores de Zn através da sua liberação gradual e da melhoria na estrutura do solo, que facilita a mobilidade do Zn. No entanto, a menor disponibilidade de Zn na segunda soca pode ser atribuída ao esgotamento dos nutrientes aplicados no ciclo anterior e à menor mineralização do CLE com o passar do tempo. O CLE é fonte de Zn com concentração de 1,1 kg de Zn por tonelada de CLE (Tabela 3). Considerando as doses aplicadas ao longo dos anos o total do nutriente aplicado foi de 15 kg de Zn.

Quanto a produtividade da cana na 1ª soca, houve variação entre os tratamentos, com valores variando de 45,4 a 98,6 t ha⁻¹ de cana (Figura 14). Observou-se que o tratamento T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE) apresentou a maior produtividade, seguido por T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) e T2 (100% AMC). Para a 2ª soca, a produtividade variou de 62,4 t ha⁻¹ (T1) a 84,9 t ha⁻¹ (T8). O tratamento T8 (R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% AMC) apresentou efeito residual do CLE e da AMC. O incremento da produtividade também foi relatado em estudo com a utilização de adubo orgânico a base de CLE (de 6,4 a 19,2 t ha⁻¹, base úmida), aplicado em um Latossolo Vermelho Amarelo e cultivado com cana (variedade RB867515) (Caetano et al., 2018). A aplicação de CLE melhora a estrutura do solo e aumenta a disponibilidade de nutrientes. Este efeito foi também observado por Silva et al. (2022), que avaliaram doses de CLE em cana planta na modalidade viveiros e relataram um incremento na produtividade devido à maior disponibilidade de nutrientes ao utilizar doses de CLE entre 2,5 e 7,5 t ha⁻¹.

Figura 13 - Brix% caldo (a), açúcar total recuperável (ATR) (b), produtividade de açúcar em toneladas de açúcar por hectare (TAH) (c) e porcentagem de sacarose da cana (Pol% cana) (d) em resposta aos tratamentos e anos de cultivo



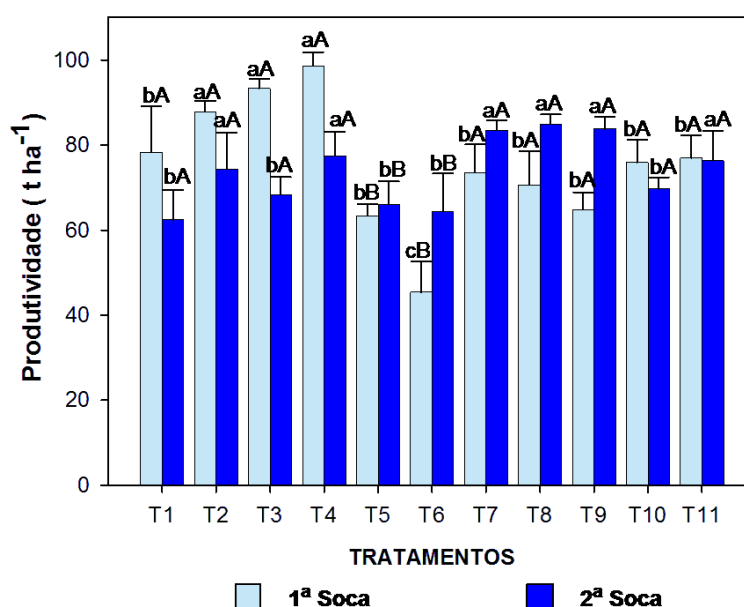
Fonte: Do próprio autor

Nota: **1ª soca**: T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca**: T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O), T3 = Residual de (R) 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, n = 4).

Os tratamentos T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE) e T5 (7,5 t ha⁻¹ de CLE) apresentaram as maiores produtividades de ATR, seguidos por T1 (controle), T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) e T6 (2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% AMC). Ainda na 1ª soca, os valores de ATR variaram de 127,6 kg ha⁻¹ (T7) a 158,7 kg ha⁻¹ (T5). Na 2ª soca, os tratamentos T7 (5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% AMC) e T8 (7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% AMC), apresentaram os menores

valores de produtividades, ou seja, 127,6 kg ha⁻¹ e 131,6 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 13c). A produtividade do ATR na cana-de-açúcar está relacionada a muitas variáveis que podem influenciar diretamente a quantidade e a qualidade dos açúcares produzidos pela planta. Fatores como temperatura, precipitação, umidade e luz solar impactam a fotossíntese e o metabolismo da planta, afetando a produção de açúcares (Figura 10).

Figura 14 - Produtividade de cana de açúcar em toneladas de colmos por hectare (TCH), em resposta aos tratamentos



Fonte: Do próprio autor

Nota: **1ª soca**: T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (90 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O); T3 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca**: T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca (75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K₂O), T3 = Residual de (R) 2,5 t ha⁻¹ de CLE; T4 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE; T5 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE; T6 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T7 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T8 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 50% da AMC; T9 = R 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T10 = R 5,0 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC; T11 = R 7,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média ± SE, n = 4).

Sendo assim, o incremento ou redução do ATR na cana-de-açúcar é multifatorial, sendo influenciada por uma combinação de fatores edáficos, climáticos, biológicos e de manejo. A otimização dessas variáveis por meio de práticas agrônômicas é essencial para maximizar a produtividade e a qualidade dos açúcares

recuperáveis na cana-de-açúcar foram mencionadas pelos autores Gonçalves *et al.*, (2021).

As doses de CLE nos tratamentos T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) e T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE), foram representativos em ambos os anos na produção de açúcar. A combinação de CLE com AMC utilizadas nos T6 (2,5 t ha⁻¹ de CLE + AMC 50%) e T10 (2,5 t ha⁻¹ de CLE + AMC 100%), não apresentaram resultados significativos, sugerindo que a associação não contribuiu para o incremento dos valores de TAH (Figura 5b). O comportamento da produtividade de TAH na 1ª soca variaram entre os tratamentos, com valores de 7,1 t ha⁻¹ de açúcar (T6) a 15,6 t ha⁻¹ de açúcar (T4). O tratamento T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE) apresentou a maior produtividade, seguido por T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) e T2 (100% AMC). Os valores de TAH variaram de 8,3 TAH (T6) a 12,1 TAH (T4). Este, como (R de 5,0 t ha⁻¹ de CLE) novamente apresentou a maior produtividade, seguido por T2 (100% AMC) e T9 (R de 2,5 t ha⁻¹ de CLE + 100% AMC). A produtividade de açúcar por hectare (TAH) é determinada pelo produto da produtividade de colmos por área e o açúcar total recuperável, dividido pelo fator de conversão para ajuste de unidades. Portanto, o TCH e o ATR têm uma relação direta na determinação do TAH. A variedade RB867515 é uma das mais versáteis e produtivas no setor sucroenergético brasileiro. Suas características de alta produtividade, elevado teor de açúcar, resistência a pragas e doenças, e adaptabilidade a diferentes condições de cultivo a tornam uma opção robusta para maximizar a produtividade de ATR e TAH (Daros *et al.*, 2010b).

Figura 15 - Análise de regressão de N foliar na 1ª e 2ª soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha⁻¹, base úmida)

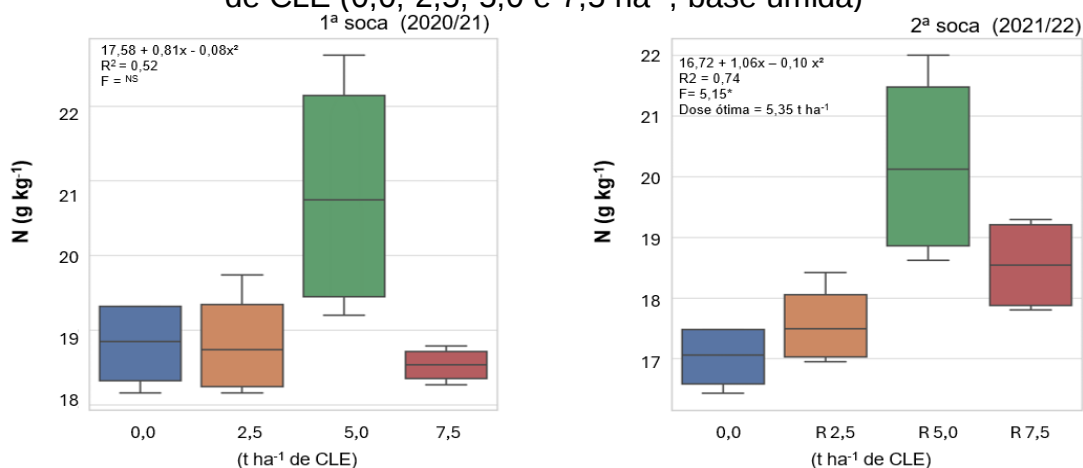


Figura 16 - Análise de regressão de Mg foliar na 1ª e 2ª soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha⁻¹, base úmida)

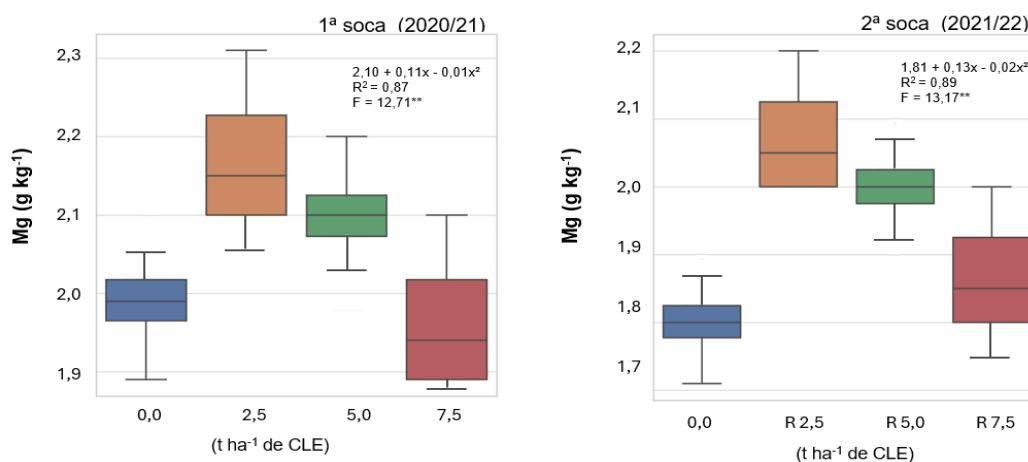
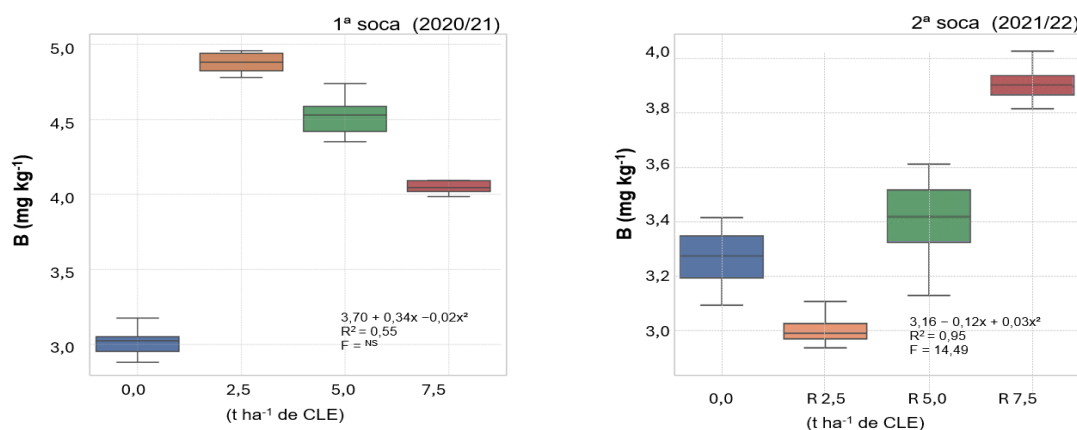
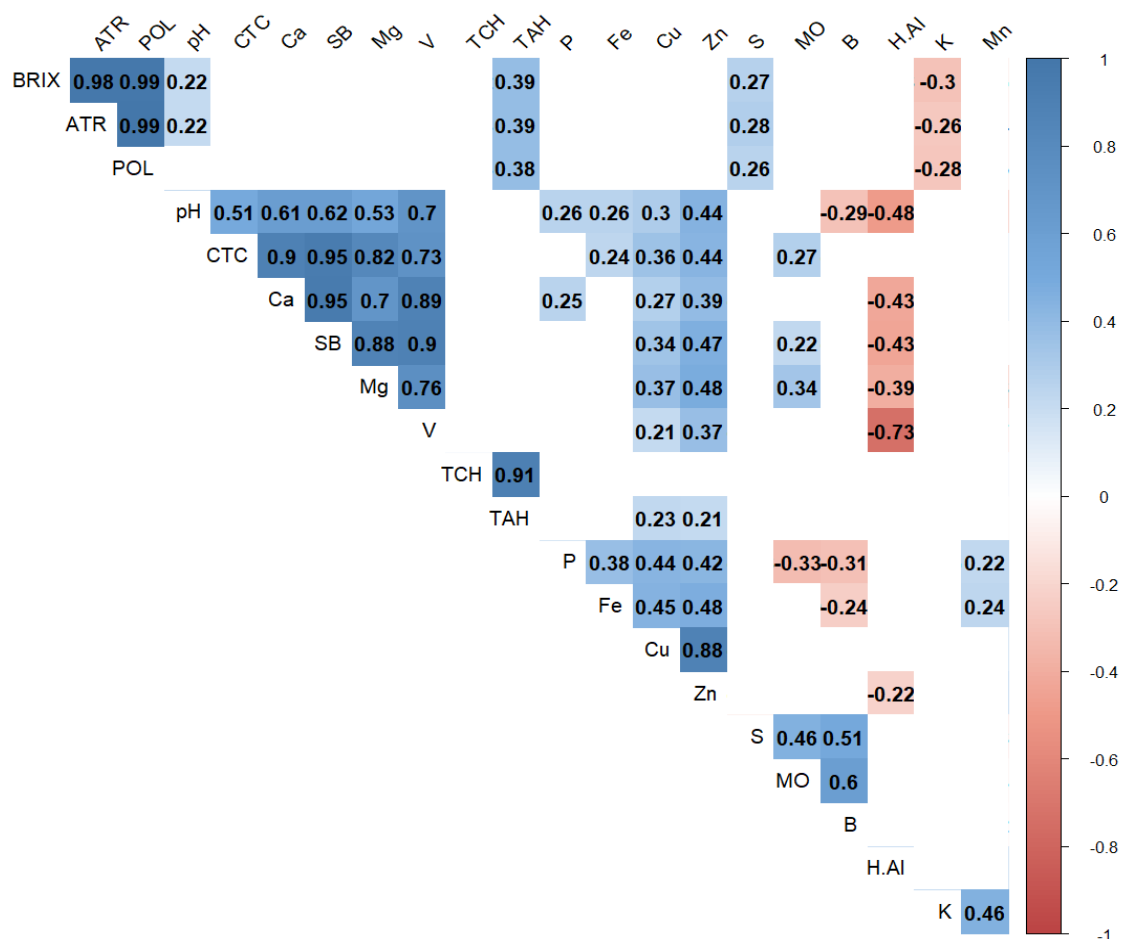


Figura 17 - Análise de regressão de B foliar na 1ª e 2ª soca, em resposta às doses de CLE (0,0; 2,5; 5,0 e 7,5 ha⁻¹, base úmida)



A análise da matriz de correlação entre as variáveis edáficas, de produtividade e de qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, conforme apresentado na (Figura 18), revela interações que influenciaram diretamente tanto o desempenho agrônomo quanto a qualidade tecnológica da cultura. Observou-se correlação positiva entre TCH, TAH, BRIX, ATR e POL, apontando a forte interdependência entre a produtividade e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

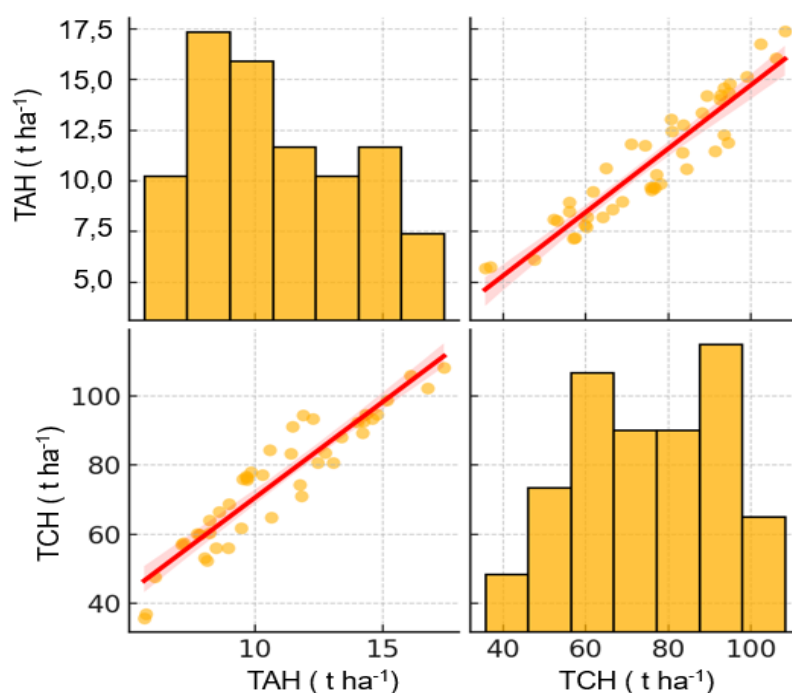
Figura 18 - Mapa de calor com as correlações de Pearson entre as variáveis de atributos químicos do solo, teores de nutrientes no solo, produtividade e qualidade tecnológica da planta



Nota: Produtividade e qualidade tecnológica. [TAH: Toneladas de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$), BRIX: graus brix, ATR: açúcar total redutível ($kg\ ha^{-1}$), POL: quantidade de pol na cana (%pol cana), TCH: Tonelada de cana por hectare], atributos químicos do solo [MO: matéria orgânica, pH: acidez ativa, H+Al: acidez potencial, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca catiônica, V: saturação de bases], os teores de nutrientes do solo [P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, B: boro, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, Zn: zinco, na camada de 0–25 cm (a) e 25–50 cm (b) de profundidade e TCH: tonelada de cana por hectare ($t\ ha^{-1}$), em resposta aos tratamentos estudados, sendo: **1ª soca:** T1 = sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca ($90\ kg\ ha^{-1}$ de N, $0\ kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 e $90\ kg\ ha^{-1}$ de K_2O); T3 = $2,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE; T4 = $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE; T5 = $7,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE; T6 = $2,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T7 = $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T8 = $7,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T9 = $2,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T10 = $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T11 = $7,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 100% da AMC. **2ª soca:** T1 = Sem aplicação do CLE e do adubo mineral convencional (AMC); T2 = 100% da AMC recomendada para cana soca ($75\ kg\ ha^{-1}$ de N e $75\ kg\ ha^{-1}$ de K_2O), T3 = Residual de (R) $2,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE; T4 = R $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE; T5 = R $7,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE; T6 = R $2,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T7 = R $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T8 = R $7,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 50% da AMC; T9 = R $2,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T10 = R $5,0\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 100% da AMC; T11 = R $7,5\ t\ ha^{-1}$ de CLE + 100% da AMC. Médias seguidas da mesma letra (maiúscula para tratamentos e minúsculas para ano) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (média $\pm$ SE, $n = 4$).

Essa inter-relação explica que a utilização do CLE consorciado ou não ao AMC maximizou a produtividade (Figura 6), na 1ª e 2ª soca e simultaneamente elevou a eficiência na produção de açúcar, conforme demonstrado pelos altos coeficientes de correlação superiores a 0,90 (Figura 19). Autores como Christofolletti *et al.*, (2021) identificaram a relação positiva entre TAH e TCH mediante a avaliação os parâmetros associados à qualidade e produtividade em cana-de-açúcar.

Figura 19 - Correlograma evidenciando a distribuição e correlação entre TCH (Tonelada de Cana por Hectare) e TAH (Tonelada de Açúcar por Hectare) na cultura da cana-de-açúcar



Fonte: Do próprio autor

Em relação aos atributos do solo, destaca-se a forte correlação positiva entre SB e CTC ($r = 0,86$), indicando que a fertilidade do solo, expressa pela disponibilidade de cátions, é um determinante chave na sustentação da produtividade da cana-de-açúcar. Além disso, a correlação positiva entre o Ca a SB ($r = 0,94$) reforça a importância do Ca na composição química do solo, atuando como um fator estabilizador da fertilidade, o que é essencial para o desenvolvimento da cultura. Observou-se também, uma correlação positiva moderada ($r = 0,51$), indicando que solos com maior pH tendem a ter maior capacidade de troca catiônica. Isso ocorre porque a CTC é influenciada pelo conteúdo de argila e matéria orgânica, que podem

reter mais cátions em pH mais altos. Tal efeito pode ser observado também no efeito positivo da correlação do pH e V ($r = 0,70$), o que é esperado, pois a saturação por bases é uma medida da porcentagem de CTC ocupada por cátions básicos. Em solos com pH mais alto, há uma maior saturação de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), o que geralmente aumenta a CTC efetiva do solo (Weil e Brady, 2017). Por outro lado, correlação negativa (Figura 18) em relação aos micronutrientes (Zn, Cu, Fe e Mn) indica que estes são menos disponíveis em pH mais elevado. Isso ocorre porque esses nutrientes tendem a se tornar menos solúveis à medida que o pH do solo aumenta (Santos *et al.*, 2021).

A correlação negativa entre $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ e o pH se explica devido a que a acidez do solo é controlada principalmente pela presença de íons de hidrogênio (H^{+}) e alumínio trocável (Al^{3+}) no complexo de troca. Assim, um aumento nos níveis de $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ está diretamente associado à redução do pH do solo, resultando em solos mais ácidos, que é uma característica marcante dos Latossolos distróficos. No entanto, a aplicação de 5,0 a 7,5 t ha⁻¹ de CLE, foram capazes de elevar os valores de pH e garantir e reduzir os valores de $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ (Figura 3c) na 1ª e 2ª soca.

3.2 CONCLUSÃO

Não houve diferenças nos teores foliares de macro e micronutrientes em função dos tratamentos estudados, exceto para os teores de N no T4 (5,0 t ha⁻¹ de CLE), B no T7 (5,0 t ha⁻¹ de CLE + 50% AMC) e Mn no T3 (2,5 t ha⁻¹ de CLE) e T7. No entanto, os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn e Zn estavam dentro da faixa ótima nutricional. Os teores de N e Mg na 1ª e 2ª soca foram influenciados pelas doses de CLE, sendo observado maiores teores de N (teor e unidade) e Mg (teor e unidade) na dose de 5,3 t ha⁻¹ de CLE, respectivamente.

Houve diferenças na 1ª e 2ª para as variáveis tecnológicas BRIX, ATR, TAH nos tratamentos T2 ao T5. Isso implica que a utilização do CLE associada ou não contribuem para o incremento dessas variáveis. As maiores produtividades foram encontradas nos tratamentos T4 para a 1ª e 2ª soca, com valores superiores aos observados no T2 (100 % AMC) e no T7 para a 2ª soca.

Conclui-se que o CLE contribui para manter o estado nutricional, melhorar a qualidade tecnológica e aumentar a produtividade da cana soca. Além disso, pode proporcionar uma redução parcial da adubação mineral (NPK). Seu uso como fertilizante orgânico

em canaviais promoverá uma gestão mais sustentável para a destinação final do lodo de esgoto sanitário.

REFERÊNCIAS

- ALLOWAY, B. J. **Zinc in Soils and Crop Nutrition**. 2. ed. Paris - França: International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association, 2008.
- ALVES, B. S. Q.; ZELAYA, K. P. S.; COLEN, F.; FRAZÃO, L. A.; NAPOLI, A.; PARIKH, S. J.; FERNANDES, L. A. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere**, Beijing, v. 31, n. 4, p. 572–582, 1 ago. 2021.
- ALVES, P. H. N.; TEIXEIRA, W. C. Biocombustíveis: trajetória histórica e o horizonte de oportunidades no Brasil. **Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica**, Juiz de Fora, v. 5, n. 2, 18 dez. 2023.
- ARAÚJO, V. D. S. *et al.* Lodo de esgoto e suas potencialidades agrícolas. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 11, n. 3, p. e14711326200, 16 fev. 2022.
- BALAGANESH, P.; VASUDEVAN, M.; SUNEETHKUMAR, S. M.; SHAHIR, S.; NATARAJAN, N. Evaluation of Sugarcane and Soil Quality Amended by Sewage Sludge Derived Compost and Chemical Fertilizer. **Nature Environment and Pollution Technology**, Pune, v. 19, n. 4, p. 1737-1741, 1 dez. 2020.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação Agronômica e AgroEstat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: SPFCA/UNESP, 2015.
- BERG, S.; DENNIS, P. G.; PAUNGFOO-LONHIENNE, C.; ANDERSON, J.; ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; ROYLE, A.; DIBELLA, L.; SCHMIDT, S. Effects of commercial microbial biostimulants on soil and root microbial communities and sugarcane yield. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg v. 56, n. 4, p. 565–580, 1 maio 2020.
- BHATT, R. Resources Management for Sustainable Sugarcane Production. In: KUMAR, S.; MEENA, R. S.; JHARIYA, M. K. **Resources Use Efficiency in Agriculture**. Singapore: Springer Singapore, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6953-1_18. Acesso em: 24 maio. 2023.
- BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; TORRES-DORANTE, L. O.; SATTOLO, T. M. S.; OTTO, R.; GARCIA, P. L.; DIAS, C. T. S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 117, n. 3, p. 367–382, 1 jul. 2020.

BOUDJABI, S.; CHENCHOUNI, H. On the sustainability of land applications of sewage sludge: How to apply the sewage biosolid in order to improve soil fertility and increase crop yield? **Chemosphere**, Oxford, v. 282, p. 131122, 1 nov. 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Brasília - DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2006. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/FIGURAS/CRSS/CONAMA/CONAMA_375_2006.pdf. Acesso em: 4 mai. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos , e dá outras providências. Brasília - DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2020a. Disponível em: [https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.downlo](https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=797) ad&id=797. Acesso em: 26 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa nº 61, de 08 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. Brasília - DF: Secretaria de Defesa Agropecuária, 2020b.

BRASIL. Secretária Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050: Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil**. Brasília - DF: SAE, 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional; Secretária Nacional de Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022a. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/agua-e-esgotos-1/2021>. Acesso em: 26 abr. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (ANA). **Levantamento da ANA aponta aumento expressivo no número de estações de tratamento de esgotos no Brasil**. Brasília: DF: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 28 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/levantamento-da-ana-aponta-aumento-expressivo-no-numero-de-estacoes-de-tratamento-de-esgotos-no-brasil>. Acesso em: 26 abr. 2024b.

BURDUCEA, M.; LOBIUC, A.; ASANDULESA, M.; ZALTARIOV, M.-F.; BURDUCEA, I.; POPESCU, S. M.; ZHELJAZKOV, V. D. Effects of Sewage Sludge Amendments on the Growth and Physiology of Sweet Basil. **Agronomy**, Basel, v. 9, n. 9, p. 548, set. 2019.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETO, R. M.; RAIJ, B. V. **Boletim 100: Recomendações de adubação e clagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022.

CARDOSO, P. H. S.; GONÇALVES, P. W. B.; ALVES, G. DE O.; PEGORARO, R. F.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A. Improving the quality of organic compost of sewage sludge using grass cultivation followed by composting. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 314, p. 115076, 15 jul. 2022.

CASTRO, S. A. Q. **Aproveitamento do N-fertilizante (N-ureia) pela cana-de-açúcar aplicado por via foliar no período de máximo crescimento da cultura em complemento à adubação de solo**. 2022. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-13092022-110622/pt-br.php>. Acesso em: 26 abr. 2024

CASTRO, S. G. Q.; COELHO, A. P.; CASTRO, S. A. Q. DE; SOUZA CHIACHIA, T. R. DE; CASTRO, R. A. DE; LEMOS, L. B. Fertilizer source and application method influence sugarcane production and nutritional status. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, 8 mar. 2023.

CHEN, Y.; CHEN, X.; ZHANG, C.; TU, P.; DENG, L. Conversion of ammonium polyphosphate (App) in acidic soil and its effect on soil phosphorus availability. **Applied Ecology and Environmental Research**, Budapest, v. 18, p. 4405-4415, 1 jul. 2020.

CHRISTOFOLETTI, D.; VASCONCELOS, J. C. S.; SPERANZA, E. A.; BARBOSA, L. A. F.; CANÇADO, G. M. A. Avaliação de parâmetros associados à qualidade e produtividade em cana-de-açúcar. Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica, 15., 2021, Campinas-SP. **Anais [...]**. Campinas: Instituto de Zootecnia. 2021.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A. DE; ZAMBON, J. L. C.; BESPALHOK FILHO, J. C. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Curitiba: RIDESA, 2010a.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A. DE; ZAMBON, J. L. C.; FILHO, J. C. B. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Curitiba: RIDESA, 2010b.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **A Cana de Açúcar**. Brasília: Portal Embrapa. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/trajetoria-do-agro/desempenho-recente-do-agro/cana-de-acucar>. Acesso em: 17 maio. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **The state of food and agriculture 2023: revealing the true cost of food to transform agrifood systems**. Rome: FAO, 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Marco estratégico para 2022-2031**. [S. l]: FAO, 2021. 44 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO; THE INTERNATIONAL FUND FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT – IFAD; UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND – UNICEF; WORLD FOOD PROGRAMME - WFP; WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **The state of food security and nutrition in the world 2023: urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum**. Rome: FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2023.

MATOS FILHO, C. H. A.; SOUSA, R. S.; ALCÂNTARA NETO, F.; SILVA, V. B.; DINIZ, Y. B.; CARVALHO JÚNIOR, G. M.; NASCIMENTO, F. N. DO; SILVA, R. R. C.; SOUSA, G. L. Avaliação de clones de cana-de-açúcar para produção de biomassa de qualidade na região canavieira do Piauí. **Peer Review**, Washington, v. 5, n. 4, p. 188-204, 2 abr. 2023.

FLORIANO, P. H. P. **Aspectos nutricionais e adubação nitrogenada para cana-de-açúcar**. 2021. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Unesp, Jaboticabal, 9 mai. 2022.

GABIRA, M. M.; SILVA, R. B. G.; BORTOLHEIRO, F. P. A. P.; MATEUS, C. M. D.'A.; BOAS, R. L. V.; ROSSI, S.; GIRONA, M. M.; SILVA, M. R. Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, Potenza, v. 14, n. 6, p. 569-575, 2021.

GONÇALVES, C. A.; CAMARGO, R.; SOUSA, R. T. X.; SOARES, N. S.; OLIVEIRA, R. C.; STANGER, M. C.; LANA, R. M. Q.; LEMES, E. M. Chemical and technological attributes of sugarcane as functions of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge as organic matter sources. **Plos One**, San Francisco, v. 16, n. 12, p. e0236852, 15 dez. 2021.

GUERRA, R. C.; ANGELIS, D. F. D. Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 72, p. 87-91, 1 abr. 2021.

LACERDA, S. M. P.; SILVA, J. O.; ROCHA, F. A.; OLIVEIRA, J. T.; SILVA, T. O.; NORONHA, R. H. F.; ALMEIDA, T. F.; FERRAZ, L. L. Reaproveitamento do lodo de esgoto da ETE do Município de Vitória Da Conquista na produção de mudas da *Leucanthemum maximum* / Reuse of sewage sludge from the ETE in the city of Vitória da Conquista in the production of seedlings for *Leucanthemum maximum*. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, n. 1, p. 1279-1288, 7 jan. 2022.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Dordrecht - Holanda: Kluwer Academic Plubishers, v. 93, 2001.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU JUNIOR, C. H. Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em nitossolo háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1796-1805, dez. 2015.

NASCIMENTO, A. L.; SOUZA, A. J. DE; OLIVEIRA, F. C.; COSCIONE, A. R.; VIANA, D. G.; REGITANO, J. B. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 258, p. 120746, 10 jun. 2020.

PIAZON NETO, M. **Nutrição mineral e produção de óleo essencial em plantações de corymbia citriodora fertilizado com composto orgânico de lodo de esgoto**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, 2012.

NICCHIO, B.; SANTOS, G. A.; LINO, A. C. M.; RAMOS, L. A.; PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H. Efeito da adubação foliar em soqueira de cana-de-açúcar. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 9, n. 2, p. 10–24, 24 jul. 2020.

NIU, H.; PANG, Z.; FALLAH, N.; ZHOU, Y.; ZHANG, C.; HU, C.; LIN, W.; YUAN, Z. Diversity of microbial communities and soil nutrients in sugarcane rhizosphere soil under water soluble fertilizer. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 16, n. 1, 22 jan. 2021.

OLIVA, F. A.; JACOMETTI, S. Análise de variedades de cana-de-açúcar: Um estudo sobre a competitividade. **Revista Alomorfia**, Presidente Prudente, v. 7, n. 4, p. 800–809, 2023.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. DE; OLIVEIRA, A. C. DE; FREIRE, M. B. G. DOS S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, p. 579–588, set. 2011.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um latossolo amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 505–519, jun. 2002.

OLIVEIRA, G. S. DE *et al.* Common Bean Productivity and Micronutrients in the Soil–Plant System under Residual Applications of Composted Sewage Sludge. **Plants**, Basel, v. 12, n. 11, p. 2153, jan. 2023.

OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M. DE; BOLONHEZI, D.; TOTTI, M. C. V.; MORAES, M. T. DE; LOVERA, L. H.; LIMA, E. DE S.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, C. F. Tillage systems impact on soil physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-sprouted seedlings. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 223, p. 105460, 1 set. 2022.

OLIVEIRA, J. C. DE. **Qualidade do solo e crescimento inicial de plantas do cerrado após adubação com resíduos de cana-de-açúcar e biochar de torta de filtro**. 2022. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Minas Gerais, ICA Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, 30 set. 2022.

OLIVEIRA, M. W. De; MACÊDO, G. A. R.; MARTINS, J. A.; OLIVEIRA, A. B. De; SILVA, V. S. G. Mineral Nutrition and Fertilization of Sugarcane. *In: Sugarcane: Technology and Research*. London: IntechOpen, 2017.

OLIVEIRA, R. A. DE; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. DE S. **Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar**. Curitiba, PR: RIDESA, 2021.

PRATES, A. R. *et al.* Composted Sewage Sludge Enhances Soybean Production and Agronomic Performance in Naturally Infertile Soils (Cerrado Region, Brazil). **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 11, p. 1677, nov. 2020.

PRATES, A. R.; KAWAKAMI, K. C.; COSCIONE, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on an Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1246, 2022a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/8/1246>. Acesso em: 1 maio. 2024.

PRATES, A. R.; KAWAKAMI, K. C.; COSCIONE, A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ARF, O.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; MOREIRA, A.; GALINDO, F. S.; HE, Z.; JANI, A. D.; CAPRA, G. F.; GANGA, A.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Sustains High Maize Productivity on an Infertile Oxisol in the Brazilian Cerrado. **Land**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1246, 2022b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/8/1246>. Acesso em: 1 maio. 2024.

R, Core Team. **A language and environment for statistical computing**: R Foundation for Statistical Computing. Viena, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 1 maio. 2024.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C. DE; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

RODRIGUES, J. D.; SOUZA FILHO, G. A. Compostagem de lodo de ETE e sua utilização na substituição parcial de fertilizantes minerais no cultivo do milho. *In: CONGRESSO FLUMINENSE DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA*, 15., 2023, Campos dos Goytacazes. **Anais eletrônicos** [...]. Campinas: Galoá, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/confict-conpg/confict-conpg-2023/trabalhos/compostagem-de-lodo-de-ete-e-sua-utilizacao-na-substituicao-parcial-de-fertiliza?lang=pt-br>. Acesso em: 1 maio. 2024.

SANTOS, D. L. J. S.; FEHR, L. C. F. A.; SOUSA, L. M. G.; TAVARES, M.; SANTOS, G. C. Análise comparativa dos custos de produção da cana-de-açúcar entre as principais cidades produtoras do Brasil. *In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS*, 16., 2019, Curitiba. **Anais** [...]. São Leopoldo: Associação Brasileira de Custos, 2019.

SANTOS, F.; FANTINEL, R.; WEILER, E.; CRUZ, J. Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 25, n.2, p. 272–278, 5 jul. 2021.

SCHMIDT, S. B.; HUSTED, S. The Biochemical Properties of Manganese in Plants. **Plants**, Basel, v. 8, n. 10, p. 381, out. 2019.

SILVA, G.; PRADO, R. Estado nutricional da cana-de-açúcar em função da aplicação de nitrogênio e silício. **Acta Tecnológica**, São Luís, v. 15, p. 27, 19 mar. 2021.

SILVA, G. M. L. **Adubação potássica sob diferentes densidades de plantio na cana-de-açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areias, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/20600>. Acesso em: 6 abr. 2024.

SILVA, J. H. B.; NASCIMENTO, M. A.; SILVA, A. V.; NETO, F. P.; ARAÚJO, J. R. E. S.; SILVA, J. M.; SILVA, A. J.; MIELEZRSKI, F. Brotação inicial, teor de sólidos solúveis e índice de maturação da cana-de-açúcar submetida à adubação com torta de filtro enriquecida / Initial breasting, soluble solids content and sugar cane maturation index submitted to fertilization with enriched filter pie. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 3, p. 32575–32592, 30 mar. 2021.

SILVA, L. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **CATENA**, Amsterdam, v. 185, p. 104258, 1 fev. 2020.

SILVA, M. B. DA *et al.* 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**, Lausanne, v. 14, 20 out. 2023.

SILVA, M.; MARTINAZZO, R.; SILVA, S. D. A.; BAMBERG, A. L.; STUMPF, L.; FERMINO, M. H.; KOHLER, T. W.; MATOSO, E. S.; VALGAS, R. A. Innovative substrates for sugarcane seedling production: Sewage sludges and rice husk ash in a waste-to-product strategy. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 157, p. 112812, 1 dez. 2020.

SILVA; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; SOUZA, A. A. B.; FRACETTO, G. G. M.; XIMENES, D. H. S. V. Effects of Sewage Sludge Stabilization Processes on Soil Fertility, Mineral Composition, and Grain Yield of Maize in Successive Cropping. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 21, n. 2, p. 1076–1088, 1 jun. 2021.

SILVA, R. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N.; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; FILHO, M. C. M. T.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Application Reduces Mineral Fertilization Requirements and Improves Soil Fertility in Sugarcane Seedling Nurseries. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, p. 4684, 2022a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4684>.

SILVA, R. S.; JALAL, A.; NASCIMENTO, R. E. N.; ELIAS, N. C.; KAWAKAMI, K. C.; ABREU-JUNIOR, C. H.; OLIVEIRA, F. C.; JANI, A. D.; HE, Z.; ZHAO, F.; FILHO, M. C. M. T.; ROSSETTO, R.; CAPRA, G. F.; NOGUEIRA, T. A. R. Composted Sewage Sludge Application Reduces Mineral Fertilization Requirements and Improves Soil Fertility in Sugarcane Seedling Nurseries. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 8, p. 4684, 2022b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4684>.

SILVA, W. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; SOUZA, A. A. B.; FRACETTO, G. G. M.; XIMENES, D. H. S. V. Effects of Sewage Sludge Stabilization Processes on Soil Fertility, Mineral Composition, and Grain Yield of Maize in Successive Cropping. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Heidelberg, v. 21, n. 2, p. 1076–1088, 1 jun. 2021.

SINHA, S. K.; KUMAR, A. D.; KUMARI, A.; SINGH, A. K. The Integrated Effect of Organic Manure, Biofertilizer and Inorganic Fertilizer on Soil Properties, Yield and Quality in Sugarcane Plant-ratoon System under Calcareous Soil of Indo-gangetic Plains of India. **Journal of Scientific Research and Reports**, West Bengal, v. 30, n. 5, p. 193–206, mar. 2024.

SOUSA, R. T. X. de. **Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar**. 2014. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 27 jan. 2014.

SOUZA, A. A. B.; RAMOS DA SILVA, W.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; SILVA, Y. J. A. B.; BIONDI, C. M. Residual effects of alkalized sewage sludge application on soil quality and sugarcane yield. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxfordshire, v. 69, n. 10, p. 1705–1717, 24 ago. 2023.

SOUZA, A. A. B.; RAMOS DA SILVA, W.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; SILVA, Y. J. A. B. DA; BIONDI, C. M. Residual effects of alkalized sewage sludge application on soil quality and sugarcane yield. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxfordshire, v. 0, n. 0, p. 1–13, 1 ago. 2022.

SOUZA, A. A. B.; SILVA, W. R.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; SILVA, Y. J. A. B.; BIONDI, C. M. Residual effects of alkalized sewage sludge application on soil quality and sugarcane yield. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxfordshire, v. 69, n. 10, p. 1705–1717, 24 ago. 2023.

SOUZA, M. T.; FERREIRA, S. R.; MENEZES, F. G.; RIBEIRO, L. S.; SOUSA, I. M.; PEIXOTO, J. V. M.; SILVA, R. V. DA; MORAES, E. R. Altura de planta e diâmetro de colmo em cana-de-açúcar de segundo corte fertilizada com organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante / Height of plant and thermal diameter in second cut sugar fertilized with organomineral of sewage sludge and bioestimulant. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 1, p. 1988–1994, 14 jan. 2020.

TAYYAB, M.; YANG, Z.; ZHANG, C.; ISLAM, W.; LIN, W.; ZHANG, H. Sugarcane monoculture drives microbial community composition, activity and abundance of agricultural-related microorganisms. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 28, n. 35, p. 48080–48096, 1 set. 2021.

OLIVEIRA, F. C.; CHIARANDIA, J. J. ABREU JUNIOR, C. H. **Lodo de esgoto: de resíduo a fertilizante orgânico**. Jundiaí: Tera Ambiental. 2022. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/lodo-de-esgoto-residuo-a-fertilizante-organico>. Acesso em: 17 maio. 2024.

VERMA, K. K.; LIU, X.-H.; WU, K.-C.; SINGH, R. K.; SONG, Q.-Q.; MALVIYA, M. K.; SONG, X.-P.; SINGH, P.; VERMA, C. L.; LI, Y.-R. The Impact of Silicon on Photosynthetic and Biochemical Responses of Sugarcane under Different Soil Moisture Levels. **Silicon**, Dordrecht, v. 12, n. 6, p. 1355–1367, 1 jun. 2020.

VOLVERÁS-MAMBUSCAY, B.; GONZÁLEZ-CHAVARRO, C. F.; HUERTAS, B.; KOPP-SANABRIA, E.; RAMÍREZ-DURÁN, J. Efecto del fertilizante orgánico y mineral en rendimiento de caña panelera en Nariño, Colombia. **Agronomía Mesoamericana**, Alajuela, p. 547–565, 1 set. 2020.

WEIL, R.; BRADY, N. **The Nature and Properties of Soils**. 15 ed. Columbus : Pearson, 2017. ISBN: 978-0133254488. 2017 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition. Acesso em: 6 abr. 2024.

YUSUF, H. C. M.; PINTO JUNIOR, O. B. Utilização Sustentável de Lodo de ETA na Confecção de Tijolos Maciços. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, v. 27, n. 4, p. 419–422, 19 dez. 2023