

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**KAREN ANDREON VIÇOSI**

**APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DO BIOSSÓLIDO GERADO NA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DE JERÔNIMO MONTEIRO - ES NA LARANJEIRA**

**ALEGRE**

**2024**

**KAREN ANDREON VIÇOSI**

**APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DO BIOSSÓLIDO GERADO NA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DE JERÔNIMO MONTEIRO - ES NA LARANJEIRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Agronomia, na área de concentração Solo e Água e Interação com Plantas.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr. Giovanni de Oliveira Garcia

ALEGRE

2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

V638a Viçosi, Karen Andreon, 1994-  
Aproveitamento agrícola do biossólido gerado na estação de tratamento de esgoto de Jerônimo Monteiro - ES na laranjeira / Karen Andreon Viçosi. - 2024.  
75 p. : il.

Orientador: Giovanni de Oliveira Garcia.  
Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Agronomia. 2. Fertilidade do solo. 3. Laranjeira. 4. Mudas. 5. Agricultura. I. Garcia, Giovanni de Oliveira. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. III. Título.

CDU: 63

---

KAREN ANDREON VIÇOSI

**APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DO BIODISSÍLIDO GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE JERÔNIMO MONTEIRO - ES NA LARANJEIRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Agronomia na área de concentração em Produção Vegetal.

Aprovada em 26 de novembro de 2024.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

**GIOVANNI DE OLIVEIRA GARCIA**

Data: 16/12/2024 09:09:10-0300

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

---

**Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

**MOISÉS ZUCOLOTO**

Data: 17/12/2024 09:26:53-0300

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

---

**Prof. Dr. Moisés Zucolotto**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Coorientador

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

**REGINA CELIA ESPINOSA MODOLO**

Data: 17/12/2024 09:06:29-0300

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

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Célia Espinosa Modolo**  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

**DELFRAN BATISTA DOS SANTOS**

Data: 16/12/2024 17:05:33-0300

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

---

**Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos**  
Instituto Federal Baiano – Campus de Serrinha

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

**LORENA CONTARINI MACHADO**

Data: 17/12/2024 08:54:56-0300

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

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lorena Contarini Machado**  
Universidade Federal do Espírito Santo

À minha avó, que não sabia ler, mas que  
conseguiu formar uma neta doutora.  
Ao meu tio, que me mostrou que não há  
nada mais valioso que o conhecimento.

## RESUMO

O lodo de esgoto, denominado de biossólido após seu tratamento, é um resíduo proveniente do tratamento do esgoto e que pode ser utilizado na agricultura devido à presença de nutrientes e matéria orgânica. O seu uso em agroecossistemas é justificado por melhorar as propriedades do solo, aumentar a diversidade microbiana e promover a ciclagem de nutrientes, sendo uma forma eficaz de incrementar a produção de alimentos. Apesar do uso do biossólido em sistemas de produção agrícolas ser uma ótima opção para o reuso desse material, essa prática ainda necessita de controle por poder proporcionar alguns riscos, como a presença de metais pesados, patógenos, compostos orgânicos e nitrogênio em excesso, que podem acarretar em prejuízos na prática agrícola. Uma outra possibilidade do uso do biossólido é como substrato para produção de mudas. Ele é capaz de aumentar o crescimento e melhorar a nutrição das mudas, reduzindo o tempo de viveiro e custo de aquisição de substratos. Porém, os atributos físicos do biossólido podem não ser favoráveis para todas as espécies, necessitando de testes para indicar a proporção ideal de biossólido em relação ao substrato. Um dos tratamentos que o lodo de esgoto pode ser submetido é a caleação, sendo essencial o entendimento da dinâmica do pH do solo com a adubação com biossólido. O lodo de esgoto não caleado reduz o pH do solo aos 21 dias. Entretanto, no geral, a aplicação de 80 t ha<sup>-1</sup> reduz o pH em 4,8%, 9,9% e 9,6%, para a textura arenosa, média e argilosa, respectivamente. O lodo de esgoto caleado apresenta alta reatividade no solo aos sete dias, com redução da reação de alcalinização ao longo do tempo. No geral, para solo arenoso, o valor de pH ficou em torno de 7,6, sendo que para os solos médio e argiloso o valor de pH ficou em 7,4, na dose 80 t ha<sup>-1</sup>. Solos de textura arenosa, com menor capacidade tampão, necessitam de menores doses de lodo de esgoto caleado para atingir o pH 7. Com bases nesses estudos, foi então testada a viabilidade do biossólido na produção de mudas e no plantio da laranjeira. A citricultura tem importância econômica na agricultura nacional, e também na região sul do Espírito Santo. O biossólido tem potencial de ser utilizado na composição de substrato para a produção de porta-enxertos cítricos, em substituição ao substrato comercial. O uso do biossólido na proporção de até 60% para mudas de limoeiro cravo e de até 45% em mudas de citrandarin 'San Diego' promoveu melhores respostas em relação ao crescimento inicial e a qualidade das plantas. Em campo, o biossólido também pode ser utilizado para a adubação inicial da cultura. A aplicação de biossólido nas doses de 100%, 115% e 150% da recomendação de N para a cultura melhorou os atributos químicos do solo, como o P, Ca, SB, CTC efetiva e saturação por bases. Os teores de cálcio, SB, t, V aumentaram o teor até os 9 meses, enquanto a matéria orgânica até os 11,7 meses. Em geral, o biossólido não promoveu aumento do teor de micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn e B) em relação à adubação mineral.

## ABSTRACT

Sewage sludge, known as biosolids after treatment, is a residue from sewage treatment that can be used in agriculture due to the presence of nutrients and organic matter. Its use in agroecosystems is justified to improve soil properties, increase microbial diversity and promote the circulation of nutrients, being an effective way to increase food production. Although the use of biosolids in agricultural production systems is a great option for reusing this material, this practice still needs to be controlled to be able to provide some risks, such as the presence of heavy metals, pathogens, organic compounds and toxins in excess, which can cause losses in agricultural practice. Another possibility for using biosolids is as a substrate for seedling production. It is capable of increasing the growth and improving the nutrition of seedlings, facilitating the lifespan and the cost of acquiring substrates. However, the physical attributes of biosolids may not be specific to all species, requiring tests to indicate an ideal proportion of biosolids in relation to the substrate. One of the treatments that sewage sludge can undergo is liming, and it is essential to understand the dynamics of soil pH with biosolids fertilization. Unlimed sewage sludge reduces soil pH after 21 days. However, in general, the application of 80 t ha<sup>-1</sup> reduces pH by 4.8%, 9.9% and 9.6% for sandy, medium and clayey soils, respectively. Limed sewage sludge presents high soil reactivity after seven days, with a reduction in the occurrence of alkalization over time. In general, for sandy soil, the pH value was around 7.6, while for medium and clayey soils the pH value was 7.4 at the dose of 80 t ha<sup>-1</sup>. Sandy textured soils with lower moderate capacity, selected from smaller doses of limed sewage sludge to reach pH 7. Based on these studies, the prediction of biosolids in seedling production and orange tree planning was then tested. Citrus farming is economically important in national agriculture, and also in the southern region of Espírito Santo. Biosolids have the potential to be used in the composition of substrate for the production of citrus rootstocks, replacing the commercial substrate. The use of biosolids in the proportion of up to 60% for Rangpur lime seedlings and up to 45% for 'San Diego' citrandarin seedlings promoted better responses in relation to initial growth and plant quality. In the field, biosolids can also be used for initial fertilization of the crop. The application of biosolids at doses of 100%, 115% and 150% of the N recommendation for the crop improved the chemical attributes of the soil, such as P, Ca, SB, CTC, effectiveness and base saturation. The levels of calcium, SB, t, V increased until 9 months, while organic matter increased until 11.7 months. In general, biosolids did not promote an increase in the content of micronutrients (Fe, Cu, Zn, Mn and B) in relation to mineral fertilization.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>ARTIGO I: EFEITO DA CALEAÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO pH DE SOLOS DE DIFERENTES TEXTURAS .....</b>	<b>19</b>
Figura 1 - Curva de incubação do lodo de esgoto em diferentes doses de cal virgem hidratada, após 2 e 72 horas.....	24
Figura 2 - Médias de pH de solos com diferentes teores de argila incubados com doses crescentes de lodo de esgoto não caleado, ao longo do tempo.....	26
Figura 3 - Médias de pH de solos com diferentes teores de argila incubados com doses crescentes de lodo de esgoto caleado, ao longo do tempo.....	28
<b>ARTIGO II: É POSSÍVEL UTILIZAR O BLOSSÓLIDO NO SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PORTA-ENXERTOS CÍTRICOS? .....</b>	<b>35</b>
Figura 1 - Altura (A), diâmetro (B), número de folhas (C) e área foliar (D) de mudas de citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), produzidas em substratos com diferentes porcentagens de biossólido, após 150 dias da emergência. ....	40
Figura 2 - Volume radicular (A), comprimento da raiz (B), área radicular em função da proporção de biossólido no substrato comercial (C) e em função das cultivares (D) citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), após 150 dias da emergência. ....	42
Figura 3- Relação H/D (A), massa seca da raiz (B), massa seca da parte área (C) e massa seca total (D) de mudas de citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), produzidas em substratos com diferentes porcentagens de biossólido, após 150 dias da emergência.....	43
Figura 4- Relação MSPA/MSR (A) e Índice de Qualidade de Dickson (B) de mudas de citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), produzidas em substratos com diferentes porcentagens de biossólido, após 150 dias da emergência. ....	45
<b>ARTIGO III: ADUBAÇÃO COM BLOSSÓLIDO E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO CULTIVADO COM LARANJEIRA PÊRA .....</b>	<b>51</b>

Figura 1 - Médias mensais de temperatura e pluviosidade em Alegre-ES, durante o período de dezembro de 2021. ....	53
Figura 2 - Linha do tempo do experimento. ....	56
Figura 3 - Valores de pH, fósforo, cálcio e H+Al no solo de acordo com a adubação. ....	59
Figura 4 - Soma de bases (SB), CTC efetiva, CTC pH 7,0, índice de saturação por bases (%) e teor de matéria orgânica do solo para diferentes tipos de adubação.. ....	61
Figura 5 - Regressão para os atributos químicos do solo de acordo com o tempo de coleta após o plantio. ....	64
Figura 6 - Teores de micronutrientes no solo cultivado com laranjeira e adubado com biossólido. ....	68
Figura 7 - Teores de micronutrientes no solo cultivado com laranjeira e adubado com biossólido ao longo do tempo.....	69

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>ARTIGO I: EFEITO DA CALEAÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO pH DE SOLOS DE DIFERENTES TEXTURAS .....</b>	<b>19</b>
Tabela 1 - Características físico-químicas do lodo de esgoto proveniente da ETE de Jerônimo Monteiro-ES. ....	21
Tabela 2 - Análise textural dos solos utilizados no experimento. ....	22
<b>ARTIGO II: É POSSÍVEL UTILIZAR O BLOSSÓLIDO NO SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PORTA-ENXERTOS CÍTRICOS? .....</b>	<b>35</b>
Tabela 1 - Resultado da análise de variância para a cultivar, dose de biossólido e interação entre a cultivar e dose para as variáveis altura, diâmetro, número de folhas (NF), comprimento de raiz (CR), volume radicular (VR), área foliar (AF), área radicular (AR), , massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), relação altura/diâmetro (H/D), relação MSPA/MSR e índice de qualidade de Dickson (IQD).....	39
<b>ARTIGO III: ADUBAÇÃO COM BLOSSÓLIDO E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO CULTIVADO COM LARANJEIRA PÊRA .....</b>	<b>51</b>
Fonte: INMET (2024). ....	53
Tabela 1 - Características físico-químicas do lodo de esgoto proveniente da ETE de Jerônimo Monteiro-ES. ....	55
Tabela 2 - Características físico-químicas do solo utilizado no experimento .....	55
Tabela 3 -Valores de F para análise de variância, a 5% de probabilidade. ....	58
Tabela 4 - Valores de sódio, potássio magnésio, alumínio e saturação por alumínio (m) em solo cultivado com laranja e diferentes fontes de adubação ao longo do tempo. ....	66

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>13</b>
REFERÊNCIAS .....	17
<b>ARTIGO I: EFEITO DA CALEAÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO pH DE SOLOS DE DIFERENTES TEXTURAS .....</b>	<b>19</b>
1. INTRODUÇÃO.....	20
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
2.1 INCUBAÇÃO DO LODO DE ESGOTO COM CAL.....	21
2.2 INCUBAÇÃO DO SOLO COM LODO DE ESGOTO.....	22
2.3 ANÁLISE DOS DADOS .....	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
3.1 INCUBAÇÃO DO LODO DE ESGOTO COM CAL.....	23
3.2 INCUBAÇÃO DO SOLO COM LODO DE ESGOTO NÃO CALEADO.....	24
3.3 INCUBAÇÃO DO SOLO COM LODO DE ESGOTO CALEADO .....	27
4. CONCLUSÃO .....	30
5. REFERÊNCIAS .....	31
<b>ARTIGO II: É POSSÍVEL UTILIZAR O BIOSSÓLIDO NO SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PORTA-ENXERTOS CÍTRICOS? .....</b>	<b>35</b>
1. INTRODUÇÃO.....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4. CONCLUSÃO .....	46
5. REFERÊNCIAS .....	47
<b>ARTIGO III: ADUBAÇÃO COM BIOSSÓLIDO E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO CULTIVADO COM LARANJEIRA PÊRA .....</b>	<b>51</b>
1. INTRODUÇÃO.....	52
2. METODOLOGIA.....	53
2.1 LOCAL .....	53
2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	54
2.3 BIOSSÓLIDO .....	54
2.4 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	54
2.5 COLETAS E ANÁLISE .....	56

2.6 ESTATÍSTICA.....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4. CONCLUSÃO .....	70
5. REFERÊNCIA.....	71
<b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>75</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

O lodo de esgoto contém matéria orgânica, macro e microelementos e substâncias biologicamente ativas e apresentam várias características desejáveis em um fertilizante, como conteúdo significativo de nutrientes que podem contribuir para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Vitenko et al., 2023). A sua aplicação de tem sido difundido devido aos seus múltiplos benefícios, dentre eles a reciclagem de nutriente, melhoria nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo e fonte de matéria orgânica; além de contribuir significativamente para o crescimento, desenvolvimento e aumento dos rendimentos das colheitas (Sharma et al., 2017). Desse modo, o biossólido pode ser tanto na produção de mudas, sendo parte do substrato, ou na adubação de culturas em campo.

Para a utilização agrícola segura do lodo de esgoto faz-se necessária a estabilização da matéria orgânica e higienização para sua aplicação no solo, dando origem então ao biossólido. Os processos de estabilização do lodo têm por objetivo atenuar o odor e conteúdo de patógenos do resíduo. Durante esse processo, o lodo de esgoto passa por processos de biotransformação dos seus componentes orgânicos, que se torna mais estável, com conseqüente redução do odor e menor concentração de microrganismos patogênicos (Fernandes; Souza, 2001). Um desses processos é a estabilização química por elevação do pH, geralmente utilizando cal virgem, sendo denominado de caleação.

A caleação permite a elevação tanto da temperatura e do pH do resíduo, com conseqüente inativação de microrganismos (Nascimento et al., 2014). A alcalinização promove o saneamento químico devido ao aumento do pH do lodo, no qual gera condições inadequadas para a sobrevivência do patógeno (Scaglia et al., 2014). O uso do biossólido caleado é capaz de promover aumento no pH do solo, precipitação do alumínio e neutralização do H<sup>+</sup>, resultando em maior exposição das cargas negativas do solo e aumentado a capacidade de troca catiônica (Nascimento et al., 2014). Desse modo, esta pode ser uma alternativa interessante para tanto para correção do solo quanto para melhorar a fertilidade de solos ácidos (Barbosa et al., 2017).

A utilização com substratos formulados com o biossólido podem trazer benefícios à produção de mudas, visto que este resíduo contribui no fornecimento de

nutrientes. O uso do biossólido agrega ao substrato uma elevada quantidade de matéria orgânica, além de elementos químicos essenciais para o bom desenvolvimento das plantas (Almeida et al., 2023). Segundo Carvalho et al. (2022), observou-se contribuição do biossólido com N, S, P, K e Ca quando comparado ao substrato comercial.

Além disso, o biossólido promove maior disponibilidade de Zn, Cu, Fe e Mg na solução do solo, o que certamente contribuiu para maiores teores destes nas mudas (Melo et al., 2021). Por ter alto teor de matéria orgânica, o biossólido favorece a solubilização de nutrientes, aumenta a absorção de micronutrientes pelas plantas, facilita a penetração das raízes, a melhora da capacidade tampão do substrato, além da liberação lenta de água e nutrientes essenciais (Abreu et al., 2019). Entretanto, mudas produzidas com 100% de composto orgânico podem não apresentar um bom desenvolvimento. Abreu et al. (2017) observaram que o substrato composto apenas por biossólido apresentou menor macroporosidade e maior microporosidade, o que demonstra sua alta capacidade de retenção de água e nutrientes devido sua elevada microporosidade, contudo, possui pouca aeração, reflexo da baixa macroporosidade.

O biossólido pode ser utilizado em campo como fertilizante orgânico. Um dos principais benefícios da aplicação do biossólido na agricultura é devido ao fornecimento de matéria orgânica, fazendo com que aumente o teor de carbono no solo, observado por Pereira et al. (2020), Hamdi et al. (2019) e Bakshi et al. (2019). Ademais, devido à alta presença de cargas presentes na matéria orgânica, o biossólido também atua no aumento de outros atributos relacionados à fertilidade do solo, como a capacidade de troca catiônica, soma de bases e teor de nutrientes (Bonini et al., 2015; Pereira et al., 2020). A matéria orgânica presente no lodo também atributos físicos do solo, de modo que aplicações de biossólido diminuam a densidade do solo, aumentaram a macroporosidade e diminuam a microporosidade (Maria et al., 2010).

A aplicação agrícola de biossólido tem um impacto substancial no acúmulo de macronutrientes do solo. Conforme ocorre a decomposição do resíduo, ocorre uma liberação lenta dos nutrientes disponíveis para microrganismos e plantas (Hamdi et al., 2019). Com essa liberação de nutrientes, ocorre o aumento das concentrações destes no solo, dentre eles o nitrogênio, fósforo e enxofre no solo adubado com lodo de esgoto, contribuindo assim para o efeito fertilizante (Bakshi et al., 2019).

Entretanto, o principal problema é o fornecimento de potássio pelo biossólido. Em geral, o resíduo contém baixos teores de K, pois é um elemento altamente solúvel e, portanto, sua maior parte permanece na água residuária durante o processo de separação do lodo de esgoto (Samara et al., 2017). Desse modo, o biossólido pode não ser uma fonte adequada de fornecimento deste nutriente (Santos et al., 2011), podendo ser necessária a complementação do nutriente na forma mineral ou de outra fonte orgânica para suprir a demanda pelas culturas. Em relação os micronutrientes, Samara et al. (2017) observaram aumento do teor de Cu e Zn nos solos tratados com biossólido, o que pode ser atribuído à formação de quelatos hidrossolúveis dos dois elementos com a matéria orgânica do lodo. A aplicação de biossólido aumentou os teores de Zn no solo, na camada de 0-20 cm (Nascimento et al., 2014). Para Santos et al. (2011), o lodo de esgoto aumentou o teor dos elementos B, Cu, Fe, Mn e Zn no solo.

Todavia, a utilização agrícola do lodo de esgoto na agricultura contém a possibilidade de riscos de contaminação ao meio ambiente, seja por meio de patógenos ou através de metais pesados, compostos orgânicos e microplásticos. A presença e a concentração de contaminantes que podem estar presente nesses biossólidos podem limitar ou proibir seu uso na agricultura (Nunes et al., 2021). No entanto, a maior preocupação é que o biossólido possa conter metais pesados potencialmente tóxicos que podem limitar seu uso agrícola. Os metais mais comuns no lodo de esgoto são Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Cd, Pb, Sn, Mo e V (Fijalkowski et al., 2017). Os principais problemas relacionados a esses elementos são devido a sua toxicidade, alta persistência no meio ambiente e capacidade de bioacumulação (Wydro et al., 2021). Quando em concentrações mais altas do que os limites permitidos, os metais pesados podem levar à contaminação da cadeia alimentar e ter consequências fatais para a flora, fauna e até seres humanos (Sharma et al., 2017). Assim, para evitar possíveis danos ambientais com a aplicação indiscriminada do lodo de esgoto na agricultura, existem critérios e normas a serem seguidas para garantir sua utilização segura. Desse modo, a aplicação agrícola do lodo de esgoto requer diretrizes estritas com supervisão regulatória apropriada para controlar a contaminação de solos agrícolas, com um controle na aplicação deste recurso na produção de alimentos e correção de solo (Nunes et al., 2021)

A legislação de âmbito federal sobre a utilização do lodo de esgoto na agricultura evoluiu ao longo do tempo, conforme Figura 1.12. A Lei nº 6.894, de 16 de

dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas abre brechas para o uso do biofertilizante na agricultura. Posteriormente, o Decreto nº 4.954/2004, que aprova o regulamento da Lei nº 6.894/1980, define o fertilizante orgânico composto e estabelece a possibilidade legal de transformar o resíduo lodo de esgoto sanitário em produto fertilizante orgânico. A Instrução Normativa da Secretaria de Defesa Agropecuária nº 27/2006 estabeleceu limites de agentes fitotóxicos, metais pesados, pragas e ervas daninhas a serem admitidos nos fertilizantes. Porém, ainda não existia uma legislação específica para a utilização do biofertilizante.

Entretanto, para evitar que o lodo de esgoto seja usado de modo indiscriminado na agricultura, e assim causar prejuízo ao meio ambiente, o Ministério do Meio Ambiente (MMA), por meio do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), publicou a Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Essa resolução, dentre outras providências, define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Além disso, estabelece critérios e procedimentos para o uso do biofertilizante em áreas agrícolas, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente. Recentemente, a Resolução nº 375 foi substituída pela Resolução Conama nº 498, de 19 de agosto de 2020, que define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizante em solos, e dá outras providências. Essa nova resolução revogou a anterior e atualizou padrões e processos para obtenção e tratamento do biofertilizante.

Assim sendo, o uso do lodo de esgoto na agricultura está condicionado a uma análise prévia de sua composição e um processo adequado de tratamento de higienização/estabilização, a fim de que seja considerado seguro pela legislação vigente. Somente assim seu uso pode ser tanto como na produção de mudas de espécies frutíferas e florestais, assim como na adubação de plantio ou cobertura de diversas culturas agrícolas

## REFERÊNCIAS

- ABREU, A. H. M.; ALONSO, J. M.; MELO, L. A.; LELES, P. S. D.; SANTOS, G. R. Characterization of biosolids and potential use in the production of seedlings of *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.24, n.3, p.591-599, 2019.
- ABREU, A. H. M. d.; LELES, P. S. d. S.; MELO, L. A. d.; OLIVEIRA, R. R. d.; FERREIRA, D. H. A. A. Caracterização e potencial de substratos formulados com biossólido na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi. e *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.27, n.4, p.1179-1190, 2017.
- ALMEIDA, R. S.; BARONI, G. R.; MELO, L. A.; ABREU, A. H. M.; LELES, P. S. S. É possível utilizar o biossólido na produção de mudas de progênies de candeia? **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.16, n.1, e9768, 2023
- BARBOSA, J. Z.; POGGERE, G. C.; DALPISOL, M.; SERRAT, B. M.; BITTENCOURT, S.; MOTTA, A. C. V. Alkalinized sewage sludge application improves fertility of acid soils. **Ciencia e Agrotecnologia**, v.41, n. 5, p. 483-493, 2017.
- BAKSHI, M.; LINÉ, C.; BEDOLLA, D. E.; STEIN, R. J.; KAEGI, R.; SARRET, G.; PRADAS DEL REAL, A. E.; CASTILLO-MICHEL, H.; ABHILASH, P. C.; LARUE, C. Assessing the impacts of sewage sludge amendment containing nano-TiO<sub>2</sub> on tomato plants: A life cycle study. **Journal of Hazardous Materials**, v.369, p.191-198, 2019.
- BONINI, C. S.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.4, p.388-393, 2015.
- CARVALHO, L. C. C. S.; MARTINS, C. A. C.; AMARAL, I. A.; PERES, A. A. C.; SANTOS, F. S. Aproveitamento de lodo de esgoto urbano como substrato para produção de mudas de cedro australiano (*Toona ciliata*) e aroeira pimenteira (*Schinus terebinthifolius*). **Scientia Plena**, v. 18, n.10, p.100201, 2022.
- FERNANDES, F.; SOUZA, S. Estabilização de lodo de esgoto. In: CLEVERSON e ANDREOLI, V. (Ed.). **Resíduos sólidos do saneamento**: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: Rima, 2001. v. 1, cap. Estabilização de Lodo de Esgoto, p. 29-55.
- FIJALKOWSKI, K.; RORAT, A.; GROBELAK, A.; KACPRZAK, M. J. J. J. o. E. M. The presence of contaminations in sewage sludge—The current situation. **Journal of Environmental Management**, v.203, p.1126-1136, 2017.
- HAMDI, H.; HECHMI, S.; KHELIL, M. N.; ZOGHLAMI, I. R.; BENZARTI, S.; MOKNI-TLILI, S.; HASSEN, A.; JEDIDI, N. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. **Catena**, v.172, p.11-20, 2019.
- MARIA, I. C.; CHIBA, M. K.; COSTA, A.; BERTON, R. S. Sewage sludge application to agricultural land as soil physical conditioner. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.967-974, 2010.

- MELO, W.; DELARICA, D.; GUEDES, A.; LAVEZZO, L.; DONHA, R.; DE ARAÚJO, A.; DE MELO, G.; MACEDO, F. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. **Science of The Total Environment**, v.643, p.1493-1501, 2018.
- NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; CRUZ, S. F. d.; ZUBA JUNIO, G. R.; BARBOSA, C. F.; FERNANDES, L. A. Metais pesados em girassol adubado com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.7, p.694-699, 2014.
- NUNES, N.; RAGONEZI, C.; GOUVEIA, C. S. S.; PINHEIRO DE CARVALHO, M. Â. A. Review of Sewage Sludge as a Soil Amendment in Relation to Current International Guidelines: A Heavy Metal Perspective. **Sustainability**, v.13, n.4, p.2317, 2021.
- PEREIRA, I. d. S.; BAMBERG, A. L.; OLIVEIRA DE SOUSA, R.; MONTEIRO, A. B.; MARTINAZZO, R.; POSSER SILVEIRA, C. A.; DE OLIVEIRA SILVEIRA, A. Agricultural use and pH correction of anaerobic sewage sludge with acid pH. **Journal of Environmental Management**, v.275, p.111203, 2020.
- SAMARA, E.; MATSI, T.; BALIDAKIS, A. Soil application of sewage sludge stabilized with steelmaking slag and its effect on soil properties and wheat growth. **Waste Management**, v.68, p.378-387, 2017.
- SANTOS, C. H.; GRASSI FILHO, H.; SANTOS, J. C.; PENTEADO, B. B. Fertilidade do solo e nutrição de tangerineiras 'Ponkan' manejados com resíduos sólidos e adubação química. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, p.75-83, 2011.
- SCAGLIA, B.; D'IMPORZANO, G.; GARUTI, G.; NEGRI, M.; ADANI, F. Sanitation ability of anaerobic digestion performed at different temperature on sewage sludge. **Science of the Total Environment**, v.466, p. 888-897, 2014.
- SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P.; SINGH, R. P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, v.64, p 117-132, 2017.
- VITENKO, T.; MARYNENKO, N.; KRAMAR, I. Characteristics of sewage sludge composition for agricultural use. **Economics and environment**, n.2, v.85, p.296-307, 2023
- WYDRO, U.; JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, A.; HAWRYLIK, E.; BUTAREWICZ, A.; RODZIEWICZ, J.; JANCZUKOWICZ, W.; WOŁEJKO, E. Heavy Metals Behavior in Soil/Plant System after Sewage Sludge Application. **Energies**, Basel, v.14, n.6, p.1584, 2021.

## ARTIGO I: EFEITO DA CALEAÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO pH DE SOLOS DE DIFERENTES TEXTURAS

**Resumo:** O lodo de esgoto é um resíduo que pode ser utilizado na agricultura devido à presença de matéria orgânica e nutrientes. Entretanto, deve ser estabilizado e higienizado, sendo a aplicação de cal virgem uma possibilidade de tratamento através da elevação do pH. Assim, o objetivo do trabalho é avaliar o pH em solos de diferentes texturas submetidos a doses de lodo de esgoto caleado e não caleado. O experimento foi composto por um fatorial triplo 2 x 3 x 6, no qual foi utilizado dois tratamentos (não caleado e caleado), três texturas de solo (arenosa, média e argilosa) e seis doses de lodo de esgoto (0, 5, 10, 20, 40 e 80 t ha<sup>-1</sup>), com três repetições. A dose necessária de cal virgem para elevar o pH em 12 foi de 44 kg m<sup>-3</sup> e 72 kg m<sup>-3</sup>, no período de 2 e 72 horas, respectivamente. Para o lodo de esgoto da ETE de Jerônimo Monteiro, a dose necessária de cal virgem hidratada para elevar o pH em 12 foi de 44 kg m<sup>-3</sup> e 72 kg m<sup>-3</sup>, para o período de 2 e 72 horas, respectivamente. O lodo de esgoto não caleado causa redução significativa no pH do solo, especialmente após 21 dias de incubação, especialmente em doses elevadas, devido à decomposição da matéria orgânica e processos de nitrificação. O lodo caleado eleva o pH do solo de forma significativa, com o efeito mais acentuado observado nos primeiros sete dias após a aplicação e nas maiores doses. Esse aumento é benéfico para corrigir solos ácidos, comuns no Brasil, mas pode reduzir temporariamente a disponibilidade de nutrientes em solos de pH alcalino. O aumento do pH foi maior em solos arenosos, que têm menor capacidade tampão, enquanto solos argilosos exigiram doses mais altas para alcançar o mesmo efeito. A interação entre tipo de solo, dose e tempo é determinante para os efeitos no pH e na disponibilidade de nutrientes, destacando a importância de avaliar a textura e composição do solo antes da aplicação. A escolha das doses e o tipo de tratamento devem considerar a textura do solo e suas características químicas para evitar efeitos adversos, como acidificação excessiva ou toxicidade por metais.

**Palavras-chave:** biossólido, caleação, argila, pH.

**Abstract:** Sewage sludge is a residue that can be used in agriculture due to the presence of organic matter and nutrients. However, it must be stabilized and sanitized, with the application of quicklime being a possible treatment by raising the pH. Thus, the objective of the work is to evaluate the pH in soils of different textures subjected to doses of limed and unlimed sewage sludge. The experiment was composed of a triple factorial 2 x 3 x 6, in which two treatments were used (not limed and limed), three soil textures (sandy, medium and clayey) and six doses of sewage sludge (0, 5, 10, 20, 40 and 80 t ha<sup>-1</sup>), with three replications. The dose of quicklime required to raise the pH by 12 was 44 kg m<sup>-3</sup> and 72 kg m<sup>-3</sup>, in a period of 2 and 72 hours, respectively. Unlimed sewage sludge causes a significant reduction in soil pH, especially after 21 days of incubation, particularly at higher doses, due to the decomposition of organic matter and nitrification processes. Limed sludge significantly increases soil pH, with the most pronounced effect observed during the first seven days after application and at higher doses. This increase is beneficial for correcting acidic soils, which are common in Brazil, but it may temporarily reduce nutrient availability in alkaline soils. The pH increase was more significant in sandy soils, which have lower buffering capacity, while clayey soils required higher doses to achieve the same effect.

The interaction between soil type, dose, and time is crucial in determining the effects on pH and nutrient availability, emphasizing the importance of assessing soil texture

and composition before application. The choice of doses and treatment type must consider soil texture and its chemical properties to avoid adverse effects, such as excessive acidification or metal toxicity.

**Keywords:** biosolids, limestone, clay, pH.

## 1. INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é um material residual produzido em estações de tratamento de esgoto e contém quantidades consideráveis de matéria orgânica e nutrientes, sendo utilizado em muitos países como fertilizante para aumentar a produção agrícola (Głab et al., 2020). Seu uso na agricultura brasileira parece uma estratégia de destinação viável, uma vez que a maioria dos solos tem baixa fertilidade (Nascimento et al., 2020). Entretanto, para ser utilizado na agricultura, o lodo de esgoto deve ser tratado visando a redução de sólidos e odores biodegradáveis, a estabilização da matéria orgânica e a eliminação de vetores, sendo então depois denominado biossólido (Campos et al., 2019).

Alguns dos processos realizados para higienização e estabilização do lodo de esgoto estão a caleação, compostagem e solarização. A cal virgem é um dos produtos químicos mais utilizados em razão do baixo custo, simplicidade do processo e eficiência na eliminação de patógeno (Nascimento, Sampaio, Cruz, et al., 2014). Nesse processo, o pH do lodo de esgoto é elevado até 12, no qual ocorre a alteração da temperatura e a ação da amônia, resultante de transformação do nitrogênio em meio fortemente alcalino (Rossmann et al., 2014). Ao final, o biossólido torna-se altamente alcalino e atua como corretivo e fornecedor de matéria orgânica a ser aplicado em solos ácidos (I. dos S. Pereira et al., 2020).

Entretanto, a dinâmica do biossólido no solo depende de diversos fatores, dentre eles a textura e seu poder tampão. Em geral, solos com menor teor de argila tem menor poder tamponante e sofrem com maior variação de pH (Samara et al., 2017). Em solos leves, com textura arenosa, as características físico-químicas são potencialmente melhoradas pela adição de biossólido, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola (Douaer et al., 2021). O poder tampão de cada solo controla as variações de pH e interferem nas reações de precipitação/dissolução, adsorção/dessorção, complexação e oxirredução de nutrientes no solo (Carmo & Silva, 2016). Desse modo, o objetivo do trabalho é avaliar as mudanças de pH em

solos de diferentes texturas quando submetidos a doses crescentes de lodo de esgoto caleado e não caleado.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi composto por um fatorial triplo 2 x 3 x 6, no qual foi utilizado dois tratamentos (lodo de esgoto não caleado e caleado), três texturas de solo (arenosa, média e argilosa) e seis doses de lodo de esgoto (0, 5, 10, 20, 40 e 80 t ha<sup>-1</sup>), com três repetições cada.

O lodo de esgoto foi coletado no leito de secagem da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), localizado em Jerônimo Monteiro-ES (20°47'19.3"S e 41°23'50.4"W). As análises foram realizadas no Laboratório de Resíduos Sólidos, localizado na área experimental do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, localizado em Alegre-ES (20°45'06.9"S e 41°29'14.7"W). As características do lodo de esgoto estão descritas na Tabela 1, analisados de acordo com metodologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2017).

Tabela 1 - Características físico-químicas do lodo de esgoto proveniente da ETE de Jerônimo Monteiro-ES.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Umidade (%)	35,42	Potássio <sup>3</sup> (%)	0,75
pH (CaCl <sub>2</sub> )	6,00	Cálcio <sup>3</sup> (%)	1,33
CTC (mmol kg <sup>-1</sup> )	479,00	Magnésio <sup>3</sup> (%)	0,33
Matéria orgânica (%)	68,38	Enxofre <sup>3</sup> (%)	0,93
Carbono orgânico <sup>1</sup> (%)	35,79	Ferro <sup>3</sup> (%)	1,45
Nitrogênio <sup>2</sup> (%)	3,39	Zinco <sup>3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	491,7
Relação C/N	11/1	Cobre <sup>3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	147,5
Fósforo <sup>3</sup> (%)	1,48	Manganês <sup>3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	28,4

<sup>1</sup>Oxidação com Bicromato de potássio; <sup>2</sup>Digestão sulfúrica; <sup>3</sup>Digestão nitro-perclórica.

### 2.1 INCUBAÇÃO DO LODO DE ESGOTO COM CAL

Para a incubação do lodo de esgoto com cal hidratada com fins de higienização, foi utilizado o método descrito por Matos (2015). Foi colocado 200 cm<sup>3</sup> de lodo seco em sacos plásticos, adicionando as seguintes doses de cal virgem hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>): 0, 12,5, 25, 50, 100 e 200 kg m<sup>-3</sup>, com quatro repetições cada. A mistura recebeu água até ser atingida a capacidade de campo, para favorecimento da reação e, após 2 h e 72 h de efetuada a mistura, o pH do material foi medido em suspensão preparada com solução CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, proporção 1:2,5. A leitura realizada em pHmetro de bancada. Uma curva do pH em função da dose de cal foi obtida, para cada tempo após efetuada, para valor de pH igual a 12.

## 2.2 INCUBAÇÃO DO SOLO COM LODO DE ESGOTO

Os diferentes solos foram coletados na área experimental da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), campus Alegre, e peneirados em peneira de 2 mm, sendo coletado uma amostra para obtenção da textura. A análise textural foi realizada pela metodologia de Teixeira et al. (2017), no qual o solo sofreu agitação lenta (50 rpm) por 16 horas em agitador tipo Wagner, utilizando o dispersante NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, com determinação das frações silte e argila pelo método da pipeta. O resultado da análise textural está descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise textural dos solos utilizados no experimento.

	<b>Areia grossa</b>	<b>Areia fina</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>	<b>Textura</b>
		%			
<b>Solo 1</b>	78	16	2	4	Arenosa
<b>Solo 2</b>	30	13	24	55	Argilosa
<b>Solo 3</b>	21	18	6	33	Média

## 2.3 ANÁLISE DOS DADOS

De posse dos dados, foi feita análise de variância e análise de regressão linear múltipla da dose do lodo de esgoto em função da porcentagem de argila do solo, nos diferentes dias de coleta, por meio do software R.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 INCUBAÇÃO DO LODO DE ESGOTO COM CAL

De acordo com o mostrado na Figura 1, a dose de cal virgem hidratada para elevar o pH em 12 foi de 44 kg m<sup>-3</sup> e 72 kg m<sup>-3</sup>, para o período de 2 e 72 horas, respectivamente. De acordo com de Matos e de Matos (2012), esses resultados confirmam o fato que a dose de cal tende a aumentar com o tempo de reação, tendo em vista que deverá neutralizar a acidez gerada no processo de degradação biológica e decomposição do bio sólido. Valores semelhantes foram encontrados por Fia, Matos e Aguirre (2005), no qual foi necessária a dose de 75 kg m<sup>-3</sup> de cal, após três dias de incubação, enquanto de Matos e de Matos (2012) obtiveram doses de 29,1 kg m<sup>-3</sup> e 71,2 kg m<sup>-3</sup>, para duas e 72 horas, respectivamente.

Essa elevação do pH do bio sólido através da adição de cal virgem confere ao resíduo a possibilidade de ser utilizado na agricultura como corretivo agrícola. Uma vez no solo, o CaO é solubilizado e dissociado em Ca<sup>2+</sup> + 2OH<sup>-</sup>, que ao se ligar com o H<sup>+</sup> da solução do solo, forma água e reduz a acidez ativa (Freiberger et al., 2020). Além disso, ocorre oxidação do N-orgânico e formação de íons amônio, que também são capazes de neutralizar a acidez do solo conferindo ao resíduo poder de neutralização superior ao do calcário (Corrêa et al., 2007, 2009). Desse modo, o bio sólido calcado pode atuar como corretivo da acidez, o que é favorável para agricultura brasileira, visto que os solos são geralmente ácidos, necessitando dessa condição alterada para a obtenção de maiores produtividades agrícola (Fia et al., 2005).

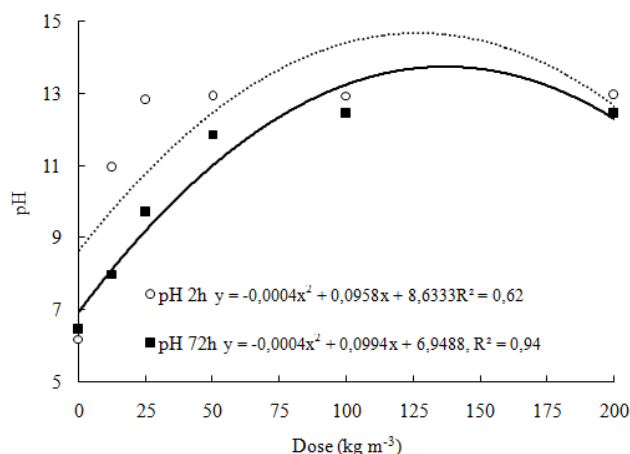


Figura 1 - Curva de incubação do lodo de esgoto em diferentes doses de cal virgem hidratada, após 2 e 72 horas.

### 3.2 INCUBAÇÃO DO SOLO COM LODO DE ESGOTO NÃO CALEADO

A Figura 2 mostra a incubação de solos com diferentes teores de argila com doses crescentes de lodo de esgoto não caleado. Aos sete dias e quatorze dias (Figuras 2A-B), é possível observar pequeno aumento do pH com a aplicação de lodo de esgoto, entretanto, nesse período, a dose não influenciou significativamente no pH. Esse aumento inicial do pH pode ter resultado do efeito da amonificação, processo pelo qual há o consumo H<sup>+</sup> e produção de OH<sup>-</sup> (Huang & Chen, 2009) e foi mais intenso no solo de textura arenosa.

Entretanto, a partir de 21 dias da incubação, foi possível observar efeito significativo da dose de lodo de esgoto aplicada. Para os três tipos de textura de solo, houve redução drástica do pH com o aumento da dose de lodo de esgoto no dia 21. O pH para os solos, na dose de 80 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, foi de 5,83 para solo arenoso, 4,16 para textura média e 3,97 para textura argiloso, o que representa uma redução, em relação ao solo sem aplicação do resíduo, de 9,1%, 37,6% e 35,9%, respectivamente (Figura 2C). Rosas-Patiño et al. (2017) afirmam que o pH desejado para a agricultura deve ser igual ou superior a 5,5.

Essa redução do pH em solos que receberam a aplicação do lodo de esgoto foi relatada por Pereira et al., (2017), nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Huang & Chen (2009) observaram uma tendência de alcalinização no solo a partir de 21 dias, ao estudar diferentes solos. Essa acidificação do solo é resultado da matéria orgânica em decomposição, que produz H<sup>+</sup> e CO<sub>2</sub> dissolvido, formando ácidos orgânicos fracos,

como o ácido carbônico, resultando em uma diminuição gradual do pH (Hamdi et al., 2019). Além disso, pode ter ocorrido reações de nitrificação do nitrogênio amoniacal, um dos fenômenos responsáveis pelo decréscimo do pH, devido à baixa relação C:N do biossólido (Pigozzo et al., 2008).

Aos 30, 40, 60 e 90 dias (Figura 2D-G), houve redução do pH com a aplicação de doses maiores de lodo de esgoto (acima de 40 t ha<sup>-1</sup>), enquanto doses menores de biossólido mantiveram o pH próximo ao solo sem aplicação. Nesse período, o teor de argila não foi significativo. No geral (Figura 2H), a aplicação 80 t ha<sup>-1</sup> reduziu pH em 4,8%, 9,9% e 9,6%, para a textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, o que manteve o pH em 6,11, 5,98 e 5,98. A variável tempo foi significativa, assim como o teor de argila e a dose de lodo de esgoto, todas influenciando negativamente no pH. De acordo Skowrońska et al., (2020), o tempo de aplicação do resíduo teve efeito menos acentuado no pH do solo quando comparado as doses aplicadas, que exerceram maior influência.

Pereira et al. (2017) observaram decréscimo nos valores de pH do solo nos tratamentos que receberam lodo de esgoto em relação à testemunha, o que pode ser benéfico para solos com pH alcalino ou próximo a neutralidade. Entretanto, I. dos S. Pereira et al. (2020) observaram que para solos com pH médio (5,5-6,0) doses altas de lodo de esgoto reduziram o pH a níveis baixos (< 4,5), o que resultou em aumento linear da disponibilidade do Al<sup>3+</sup> no solo. Em solos ácidos, podem ocorrer altos níveis de alumínio ou manganês associados à deficiência de cálcio e toxidez de ferro que limitam o crescimento vegetal (Pavinato; Rosolem, 2008). Além disso, quando os valores de pH estão abaixo de 6, ocorre o aumento da mobilidade e disponibilidade de metais pesados no solo (Nunes et al., 2021) e micronutrientes como Cu, Zn e Mn tendem a estarem mais disponíveis e com concentrações elevadas, a ponto de causar fitotoxidez às plantas (Pereira et al., 2020).

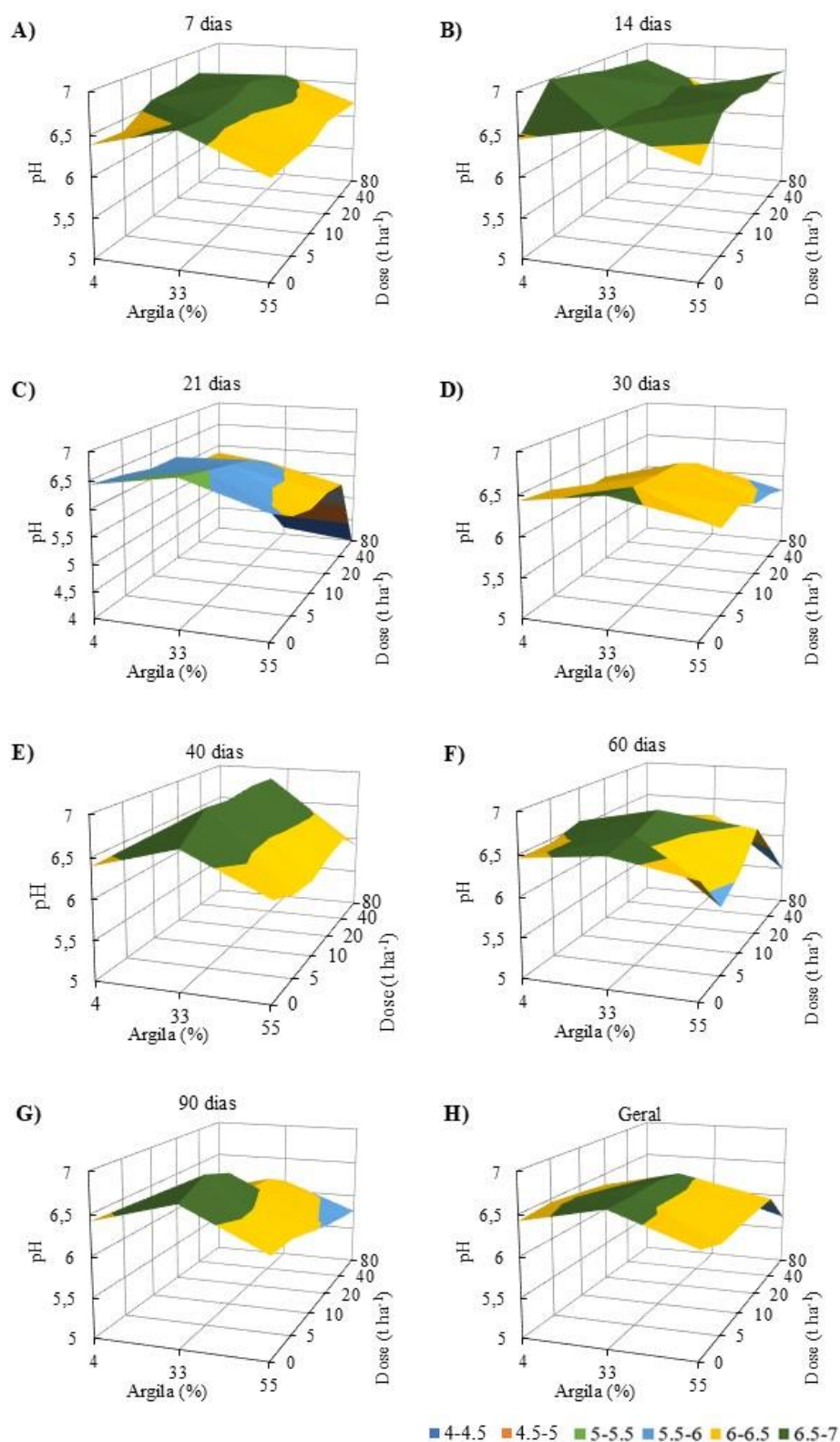


Figura 2 - Médias de pH de solos com diferentes teores de argila incubados com doses crescentes de lodo de esgoto não caledado, ao longo do tempo.

7 dias:  $\text{pH} = 6.604 - 0.0002D - 0.005A^*$ ; 14 dias:  $\text{pH} = 6.79 - 0.0009D - 0.003A^*$ ; 21 dias:  $\text{pH} = 6.708 - 0.021D^* - 0.012A^*$ ; 30 dias:  $\text{pH} = 6.389 - 0.007D^* - 0.008A$ ; 40 dias:  $\text{pH} = 6.532 - 0.0038D - 0.0002A$ ; 60

dias:  $\text{pH} = 6.532 - 0.004D^* - 0.003A$ ; 90 dias:  $\text{pH} = 6.393 - 0.005D^* - 0.004A$ ; geral:  $\text{pH} = 6.633 - 0.006D^* - 0.004A^* - 0.0015T^*$ . \*Significativo a 5% de probabilidade.

Em relação à textura, solos com altos teores de argila tem maior poder tamponante, o que resulta em menor variação do pH do solo (Poggere et al., 2012) e maiores doses de lodo de esgoto para ocorrer variação significativa do pH, ao comparar com solos com menor teor de argila. Para solo arenoso, foi maior a redução do pH a partir da dose de  $40 \text{ t ha}^{-1}$ , enquanto para solos de textura média e argilosa a maior redução ocorreu na dose de  $80 \text{ t ha}^{-1}$ . No entanto, a redução do pH é variável e depende do tipo de solo, dosagem e características do lodo, tempo de incubação, dentre outros fatores (Dhanker et al., 2021).

### 3.3 INCUBAÇÃO DO SOLO COM LODO DE ESGOTO CALEADO

A Figura 3 mostra o resultado da incubação dos diferentes solos com lodo de esgoto caleado ao longo do tempo. É possível observar que, aos sete dias (Figura 3A) houve incremento do pH para o solo com 4% de argila, que na dose de  $5 \text{ t ha}^{-1}$  elevou o pH de 6,39 para 7,35. Para solos com 33% e 55% de argila, o aumento do pH foi linear em função da dose aplicada. Na dose de  $80 \text{ t ha}^{-1}$ , houve um incremento de 123%, 115% e 129% do pH para solos de textura arenosa, média e argilosa, respectivamente. O solo com maior teor de argila apresentou pH final de 8.

De acordo com Serrat et al. (2011), a maior parte dos hidróxidos reagem no início da incubação. A adição de CaO no processo de estabilização do lodo de esgoto resulta em material com elevado poder de correção da acidez, podendo inclusive alcançar valores de pH acima do recomendado para agricultura (Nascimento, Sampaio, Junio, et al., 2014). Uma vez no solo, o CaO é solubilizado e dissociado em  $\text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$ , que se liga ao  $\text{H}^+$  da solução do solo formando água e reduzindo a acidez ativa (Freiberger et al., 2020). Entretanto, essa alcalinização inicial reduz a disponibilidade de nutrientes, o crescimento e a adsorção de nutrientes das plantas, ocasionado a formação de compostos quelatos indisponíveis para as plantas (Melo et al., 2019), o que pode ser prejudicial temporariamente para as culturas.

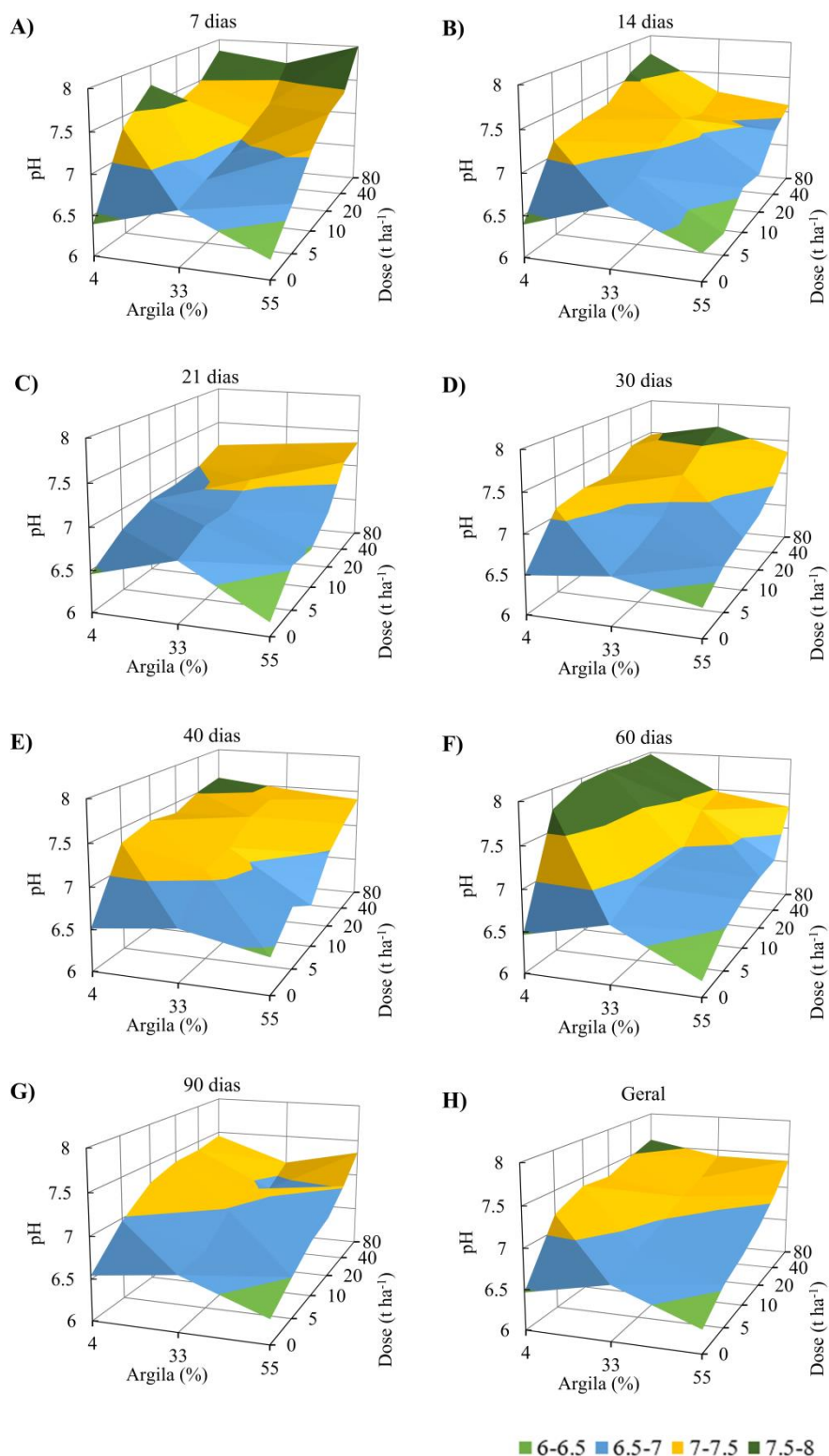


Figura 3 - Médias de pH de solos com diferentes teores de argila incubados com doses crescentes de lodo de esgoto caledado, ao longo do tempo.

7 dias:  $\text{pH} = 6.973 + 0.137\text{D}^* - 0.005\text{A}^*$ ; 14 dias:  $\text{pH} = 7.092 + 0.009\text{D}^* - 0.012\text{A}^*$ ; 21 dias:  $\text{pH} = 6.707 + 0.009\text{D}^* - 0.002\text{A}$ ; 30 dias:  $\text{pH} = 6.928 + 0.011\text{D}^* - 0.006\text{A}^*$ ; 40 dias:  $\text{pH} = 7.125 + 0.009\text{D}^* - 0.008\text{A}^*$ ; 60 dias:  $\text{pH} = 7.485 + 0.010\text{D}^* - 0.020\text{A}^*$ ; 90 dias:  $\text{pH} = 6.997 + 0.008\text{D}^* - 0.008\text{A}^*$ ; geral:  $\text{pH} = 7.055 + 0.01\text{D}^* - 0.009\text{A}^* - 0.0004\text{T}$ . \*Significativo a 5% de probabilidade.

Após 14 de incubação (Figura 3B), os valores de pH se mantiveram em elevação, em especial no solo arenoso, no qual as doses de 40 e 80 apresentaram pH acima de 7,5. Aos 21 dias (Figura 3 C), a tendência de elevação do pH se manteve, porém não houve influência significativa do teor de argila. Aos 30 dias (Figura 3D), o solo de textura média obteve incremento maior de pH na dose de 80 t ha<sup>-1</sup>, com pH final de 7,65. Aos 40 e 60 dias (Figura 3E-F), o solo arenoso foi o mais influenciado pela aplicação do bio sólido calcado. Aos 90 dias (Figura 3G), os solos de diferentes texturas apresentaram comportamento semelhante, com o pH máximo variando entre 7,0-7,5. Essa redução do pH, comparado com o tempo de sete dias, já era esperado, visto que a reatividade da cal diminui com elevação do pH e o aumento de Ca no sistema (Serrat et al. 2011).

No geral, ambos os solos apresentaram aumento semelhante do pH no final do experimento, de 114%, 107% e 116%, respectivamente, para solo arenoso, médio e argiloso, na dose de 80 t ha<sup>-1</sup>. Nesta dose, para solo arenoso, o valor de pH ficou em torno de 7,6, sendo que para os demais solos o valor de pH ficou em 7,4. Entretanto, a variável tempo não apresentou significância (Figura 3H).

O aumento do pH do solo com a aplicação do bio sólido calcado já era esperado. Marin et al. (2010) observaram aumento do pH com o aumento da dose do lodo de esgoto calcado para três classes de solo, corroborando com os resultados apresentados por Serrat et al. (2011), estudando dois lodos de esgoto provenientes de ETE diferentes, observaram que tendência de acréscimos do pH do solo com a elevação da dose aplicada.

Entretanto, o aumento para pH acima de 7 altera a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Em pH alcalino, ocorre a redução da disponibilidade de N, P, K, Ca, Mg, Zn, B e Cu (Malavolta, 2006). Rosas-Patiño et al. (2017) observaram uma redução da concentração de Al, Fe, Mn, K, Cu e B no solo com a calagem. Em nosso experimento, o solo de textura arenosa, com menor capacidade tampão, necessitou de 1,9 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto calcado para atingir o pH 7, enquanto os solos de textura média e argilosa necessitaram de 24,2 e 44 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Segundo Hamdi et al. (2019), a variação do pH em solos corrigidos depende de vários fatores, incluindo a qualidade do lodo, a dose aplicada, bem como as características do solo e as condições de mineralização. Isso vai de encontro com o descrito por Samara et al. (2017), no qual afirmam que aumento do pH do solo após

a adição do biossólido dependem do pH inicial do solo, da capacidade de tamponamento dos solos e da presença de  $\text{CaCO}_3$ .

O poder tampão de cada solo controla as variações de pH e, conseqüentemente, interferem nas reações e disponibilidade de nutrientes na solução do solo (Carmo & Silva, 2016). Os mesmos autores observaram que a menor dose de lodo de esgoto caleado foi necessária para elevar o pH do solo para 6,7 em Neossolo quartzarênico (93% de areia), enquanto foi necessária uma dose quase dez vezes maior para atingir o mesmo valor em um Latossolo Vermelho distroférico, com mais de 50% de argila. Samara et al. (2017) observaram aumento maior do pH em solo ácido com baixo teor de argila, que possui baixa capacidade tamponante, ao comparar com solos com maior teor de argila. Além disso, em solos de clima tropical, a capacidade de troca catiônica é fortemente dependente do pH, uma vez que a matéria orgânica, os óxidos de ferro/alumínio e o colóides de argila 1:1 são caracterizados por cargas negativas afetadas pelo pH do solo (Florentino et al., 2019). Desse modo, deve-se considerar o teor de argila do solo para definir a dose de lodo de esgoto caleado a ser aplicada.

#### **4. CONCLUSÃO**

Para o lodo de esgoto da ETE de Jerônimo Monteiro, a dose necessária de cal virgem hidratada para elevar o pH em 12 foi de  $44 \text{ kg m}^{-3}$  e  $72 \text{ kg m}^{-3}$ , para o período de 2 e 72 horas, respectivamente.

O lodo de esgoto não caleado causa redução significativa no pH do solo, especialmente após 21 dias de incubação, especialmente em doses elevadas, devido à decomposição da matéria orgânica e processos de nitrificação.

O lodo caleado eleva o pH do solo de forma significativa, com o efeito mais acentuado observado nos primeiros sete dias após a aplicação e nas maiores doses. Esse aumento é benéfico para corrigir solos ácidos, comuns no Brasil, mas pode reduzir temporariamente a disponibilidade de nutrientes em solos de pH alcalino. O aumento do pH foi maior em solos arenosos, que têm menor capacidade tampão, enquanto solos argilosos exigiram doses mais altas para alcançar o mesmo efeito.

A interação entre tipo de solo, dose e tempo é determinante para os efeitos no pH e na disponibilidade de nutrientes, destacando a importância de avaliar a textura e composição do solo antes da aplicação. A escolha das doses e o tipo de tratamento

devem considerar a textura do solo e suas características químicas para evitar efeitos adversos, como acidificação excessiva ou toxicidade por metais.

## 5. REFERÊNCIAS

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília: MAPA, 2017.

CAMPOS, T.; CHAER, G.; LELES, P. DOS S.; SILVA, M.; SANTOS, F. Leaching of Heavy Metals in Soils Conditioned with Biosolids from Sewage Sludge. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019.

CARMO, D. L. DO; SILVA, C. A. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1762–1772, 2016.

CORRÊA, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARCELINO, R.; MAUAD, M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, 2007.

CORRÊA, J. C.; FREITAG, E. E.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, D. M.; MARCELINO, R. Aplicação superficial de calcário e diferentes resíduos em soja cultivada no sistema plantio direto. **Bragantia**, v. 68, 2009.

DHANKER, R.; CHAUDHARY, S.; GOYAL, S.; GARG, V. K. Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101642, 2021.

DOUAER, N.; DOUAOUI, A.; MEHAIGUENE, M.; ZOUIDI, M.; HAMZA, W. The effect of municipal sewage sludge on properties physicochemical and microbial agricultural soil. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 13, n. 1, p. 10804, 2021.

FIA, R.; MATOS, A. T. DE; AGUIRRE, C. I. Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caleado. **Engenharia na agricultura**, v. 13, n. 4, p. 287–299, 2005.

FLORENTINO, A. L.; FERRAZ, A. DE V.; GONÇALVES, J. L. DE M.; ASENSIO, V.; MURAOKA, T.; SANTOS DIAS, C. T. DOS; NOGUEIRA, T. A. R.; CAPRA, G. F.; ABREU-JUNIOR, C. H. Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 177–187, 2019.

FREIBERGER, M. B.; CASTOLDI, G.; CAPUANI, S.; RIBEIRO, D. O.; SILVA, F. G.; BÜLL, L. T. Long-term sewage sludge application in a tropical Oxisol: Effects on acidity and availability of micronutrientes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 402–408, 2020.

GLĄB, T.; ŻABIŃSKI, A.; SADOWSKA, U.; GONDEK, K.; KOPEĆ, M.; MIERZWAHERSZTEK, 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**, v. 197, p. 104493, 2020.

HAMDI, H.; HECHMI, S.; KHELIL, M. N.; ZOGHLAMI, I. R.; BENZARTI, S.; MOKNITLILI, S.; HASSEN, A.; JEDIDI, N. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. **Catena**, v. 172, p. 11–20, 2019.

HUANG, C.-C.; CHEN, Z.-S. Carbon and nitrogen mineralization of sewage sludge compost in soils with a different initial pH. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 55, n. 5, p. 715–724, 1 out. 2009.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. [s.l.] Agronômica Ceres, 2006.

MARIN, L. M. K.; BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C. V.; CARAFINI, C.; LIMA, M. R. DE; SERRAT, B. M.; MOCHIDA, G. A. Determinação da taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado por processo alcalino em solos da região metropolitana de Curitiba. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, p. 113–118, 2010.

MATOS, A. T. DE. **Manual de análise de resíduos sólidos e águas residuárias**. Viçosa: Editora UFV, p. 149, 2015.

MATOS, M. P. DE; MATOS, A. T. DE. Dose de cal hidratada e características químicas de um lodo de esgoto doméstico submetido à caleação. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 20, n. 4, p. 357–363, 2012.

MELO, R. M.; CARMO VIEIRA, M. DO; OLIVEIRA CARNEVALI, T. DE; GONÇALVES, W. V.; TORALES, E. P.; TOLOUEI, S. E. L.; SANTOS, C. C. Calagem e textura do substrato afetam o desenvolvimento de *Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 99–108, 2019.

NASCIMENTO, ALTINA L; SAMPAIO, R. A.; CRUZ, S. F. DA; ZUBA JUNIO, G. R.; BARBOSA, C. F.; FERNANDES, L. A. Metais pesados em girassol adubado com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, 2014.

NASCIMENTO, ALTINA LACERDA; SAMPAIO, R. A.; JUNIO, G. R. Z.; FERNANDES, L. A.; CRUZ, S. F. DA; CARNEIRO, J. P.; BARBOSA, C. F.; LIMA, N. N. DE. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, 2014.

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**, v. 258, p. 120746, 2020.

- NUNES, N.; RAGONEZI, C.; GOUVEIA, C. S. S.; PINHEIRO DE CARVALHO, M. Â. A. Review of sewage sludge as a soil amendment in relation to current international guidelines: A heavy metal perspective. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2317, 2021.
- PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, 2008.
- PEREIRA, I. DOS S.; BAMBERG, A. L.; OLIVEIRA DE SOUSA, R.; MONTEIRO, A. B.; MARTINAZZO, R.; POSSER SILVEIRA, C. A.; OLIVEIRA SILVEIRA, A. DE. Agricultural use and pH correction of anaerobic sewage sludge with acid pH. **Journal of Environmental Management**, v. 275, p. 111203, 2020.
- PEREIRA, N. G. F.; FRAZÃO, L. A.; OLIVEIRA, A. L. G.; CARDOSO, P. H. S.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Efeitos da aplicação de lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos nos atributos químicos e microbiológicos de um cambissolo háplico. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 115–127, 2017.
- PIGOZZO, A. T. J.; LENZI, E.; LUCA JÚNIOR, J. DE; SCAPIM, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; COSTA, A. C. S. DA. Reação do solo e disponibilidade de micronutrientes, em solo de textura média, tratado com lodo de esgoto e cultivado com milho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, p. 569–579, 2008.
- POGGERE, G. C.; SERRAT, B. M.; MOTTA, A. C. V.; BITTENCOURT, S.; DALPISOL, M.; ANDREOLI, C. V. Lodos de esgoto alcalinizados em solos do estado do Paraná: taxa de aplicação máxima anual e comparação entre métodos para recomendação agrícola. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, p. 429–438, 2012.
- ROSAS-PATIÑO, G.; PUENTES-PÁRAMO, Y. J.; MENJIVAR-FLORES, J. C. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. **Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v. 18, n. 3, p. 529–541, 2017.
- ROSSMANN, M.; VIEIRA, D. B.; AVELAR, F. F.; MATOS, A. T. DE. Redução da viabilidade de ovos de helmintos em lodo de esgoto doméstico caledado. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 22, n. 1, p. 43–49, 2014.
- SAMARA, E.; MATSI, T.; BALIDAKIS, A. Soil application of sewage sludge stabilized with steelmaking slag and its effect on soil properties and wheat growth. **Waste Management**, v. 68, p. 378–387, 2017.
- SERRAT, B. M.; SANTIAGO, T. R.; BITTENCOURT, S.; MOTTA, A. C. V.; SILVA, L. A. T. P. DA; ANDREOLI, C. V. Taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado pelo processo de estabilização alcalina: estudo comparativo de curvas de pH de solos. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)**, n. 19, p. 30–37, 2011.
- SKOWROŃSKA, M.; BIELIŃSKA, E. J.; SZYMAŃSKI, K.; FUTA, B.; ANTONKIEWICZ, J.; KOŁODZIEJ, B. An integrated assessment of the long-term

impact of municipal sewage sludge on the chemical and biological properties of soil. **Catena**, v. 189, p. 104484, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

## ARTIGO II: É POSSÍVEL UTILIZAR O BIOSSÓLIDO NO SUBSTRATO PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE PORTA-ENXERTOS CÍTRICOS?

**Resumo:** O bioossólido, apesar de ser um resíduo, tem potencial de ser utilizado na produção de mudas devido à presença de elementos essenciais às plantas. Apesar de ser estudado especialmente em espécies florestais, pode ser utilizado também em mudas de espécies frutíferas, dentre elas os citros. Objetivou-se com trabalho tem como objetivo avaliar o uso do bioossólido em substituição ao substrato comercial na produção de porta-enxertos de limoeiro Cravo e citrandarin. O experimento foi realizado em Alegre-ES, em fatorial 2x5, em bloco casualizados, de quatro repetições com oito plantas. Os tratamentos são duas cultivares de porta-enxerto cítrico, o limoeiro cravo 'Santa Cruz' (*Citrus limonia*) e citrandarin 'San Diego' (*C. sunki x Poncirus trifoliata*), em cinco proporções de bioossólido e substrato comercial (0, 25, 50, 75 e 100%). Houve efeito significativo entre a interação entre cultivar e o substrato para maioria das variáveis. A dose de bioossólido no substrato apresentou comportamento quadrático, com as mudas de limoeiro cravo apresentando crescimento superior ao citrandarin. O uso de bioossólidos em proporções específicas (até 60% para o limoeiro Cravo e até 45% para o citrandarin) mostrou melhorias no crescimento inicial e na qualidade das mudas. A interação entre o tipo de porta-enxerto e a proporção de bioossólido no substrato foi significativa para a maioria das variáveis de crescimento e qualidade das mudas, com o limoeiro Cravo apresentando maior vigor durante o período experimental. O uso de bioossólidos diminui custos associados à aquisição de substratos e oferece uma solução sustentável para o reaproveitamento de resíduos, reduzindo impactos ambientais. Apesar dos benefícios, o manejo cuidadoso do substrato é necessário para evitar limitações físicas ou químicas que possam comprometer o desenvolvimento das plantas.

**Palavras-chave:** Lodo de esgoto; Citrus sp.; Citrandarin; Limoeiro cravo.

**Abstract:** Biosolids, despite being a waste product, have the potential to be used in seedling production due to the presence of essential elements for plants. Although it has been studied especially in forest species, it has to be used also in the seedlings of fruit species, among them citrus. This work aimed to evaluate the biosolids as a substitute for commercial substrate in the production of rootstocks for 'Santa Cruz' sour orange and 'San Diego' citrandarin. The experiment was conducted in Alegre-ES, in a 2x5 factorial, in randomized blocks, with four replications of eight plants each. The treatments are two cultivars of citrus rootstock, the 'Santa Cruz' sour orange (*Citrus limonia*) and 'San Diego' citrandarin (*C. sunki x Poncirus trifoliata*), in five proportions of biosolids and commercial substrate (0, 25, 50, 75, and 100%). There was a significant effect between the interaction of cultivar and substrate for most of the variables. The dose of biosolids showed a quadratic behavior, with the 'Santa Cruz' sour showing superior growth to the citrandarin. The use of biosolids reduces costs associated with the acquisition of substrates and offers a sustainable solution for waste reuse, reducing environmental impacts. Despite the benefits, careful handling of the substrate is necessary to avoid physical or chemical limitations that may compromise plant development.

**Keywords:** Sewage sludge; Citrus sp.; Citrandarin; Rangpur lime.

## 1. INTRODUÇÃO

No processo de produção de mudas, a escolha do substrato tem grande importância, pois ele tem função de sustentar, fornecer nutrientes e propiciar condições adequadas ao crescimento inicial das plantas. Atualmente, diversos resíduos industriais e/ou urbanos têm sido aproveitados como substratos, minimizando o impacto ambiental que seria causado pelo descarte inadequado desses resíduos (Souza et al., 2022a). Dentre os resíduos destaca-se o biossólido, proveniente do tratamento do lodo de esgoto, constituindo uma alternativa com benefícios econômicos e socioambientais e que contribui para a sustentabilidade agrícola (Collivignarelli; Abbà; Benigna, 2020).

O biossólido pode suprir, totalmente ou parcialmente, as demandas iniciais de nutrientes no processo de produção de mudas, pois o oferece às plantas matéria orgânica e elementos essenciais para seu desenvolvimento (Freitas; Alvarenga, Durães, 2019), dentre eles nitrogênio, fósforo, enxofre, cálcio e outros nutrientes, o que o torna uma matéria-prima útil para ser utilizada na agricultura (Jatav et al., 2021; Muter et al., 2022). Sendo assim, os substratos à base de biossólido são capazes de aumentar o crescimento e melhorar a nutrição das mudas, reduzindo o tempo de viveiro e o custo com aquisição de substratos (Viçosi; Garcia, 2022).

Para a produção moderna de enxertia de mudas cítricas, o porta-enxerto é um componente essencial utilizado em todas as principais regiões produtoras do mundo. O porta-enxerto tem como objetivo proporcionar à árvore enxertada maior tolerância a doenças, pragas e condições abióticas desafiadoras, em comparação com a árvore frutífera de raiz própria (Bowman; Joubert; 2020). Na citricultura brasileira, houve grande predominância do uso do porta-enxerto limoeiro Cravo 'Santa Cruz' (*Citrus limonia*) nos pomares, devido seu alto desempenho produtivo e boa compatibilidade com diversos enxertos. Entretanto, esse limoeiro tem susceptibilidade à estresses bióticos e abióticos, tendo sido cada vez menos recomendado e menos empregado em novos plantios (Sombra et al., 2019). Dentre os diversos novos porta-enxertos que estão sendo estudados, destaca-se o uso de citrandarins, provenientes do cruzamento de tangerineira com trifoliata, e que possuem elevada produção e boa qualidade de frutos, além de ser resistente às principais doenças (Rodrigues et al., 2015)

Diversas pesquisas têm mostrado o potencial do uso do biossólido na produção de mudas de diversas espécies, principalmente em espécies florestais, como a aroeira (Abreu et al., 2019), pau brasil (Gomes et al., 2019) e jerivá (Souza et al., 2022a). Entretanto, o manejo do substrato é um desafio no estabelecimento de pomares para espécies frutíferas, sendo que os estudos na área de produção de mudas frutíferas com utilização do biossólido ainda são escassos, com destaque para a acerola (Costa et al., 2023), maracujazeiro-amarelo (Freitas et al., 2015) e mamão papaia (Souza et al., 2021). Desse modo, objetiva-se com este trabalho avaliar o potencial do uso do biossólido em substituição ao substrato comercial na produção de porta-enxertos de limoeiro Cravo 'Santa Cruz' e citrandarin 'San Diego'.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Fazenda Experimental do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, no município de Alegre – ES, durante o ano de 2021. O experimento foi montado em esquema fatorial 2x5, no delineamento em bloco casualizados, de quatro repetições compostas por oito plantas. Os tratamentos correspondem a duas cultivares de porta-enxerto cítrico, o limoeiro cravo 'Santa Cruz' (*Citrus limonia*) e citrandarin 'San Diego' (*Citrus sunki* x *Poncirus trifoliata*), em cinco proporções da mistura de biossólido e substrato comercial (0, 25, 50, 75 e 100%).

O substrato comercial (Provaso®) utilizado é um composto bioestabilizado de bagaço de cana, turfa, rocha calcárea, resíduo orgânico agroindústria classe A esterco e camas de aviário, cinzas e torta vegetal. O substrato comercial tem as seguintes características: pH 6,1; C 13,7 dag kg<sup>-1</sup>; N 13,7 g kg<sup>-1</sup>; P 16,5 g kg<sup>-1</sup>; K 9,2 g kg<sup>-1</sup>; Ca 40,0 g kg<sup>-1</sup> e Mg 6,0 g kg<sup>-1</sup> (Fagundes; Cruz, 2015).

O lodo de esgoto foi obtido da Estação de Tratamentos de Efluentes do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) da cidade de Jerônimo Monteiro-ES, e foi submetido ao processo de solarização para estabilização e higienização. A composição do biossólido é pH 6,0; C 23,9 dag kg<sup>-1</sup>; N 30,3 g kg<sup>-1</sup>; P 9,3 g kg<sup>-1</sup>; K 3,1 g kg<sup>-1</sup>; Ca 20,1 g kg<sup>-1</sup> e Mg 4,4 g kg<sup>-1</sup>.

As diferentes proporções de biossólido/substrato comercial foram distribuídas em tubetes de 200 cm<sup>3</sup>. Em cada recipiente, foi realizada a semeadura de duas

sementes, a dois centímetros de profundidade. As plantas foram deixadas sob tela com 50% de sombreamento e as irrigações realizadas diariamente, suficientes para manter a umidade do substrato próximo à capacidade de campo. Quando as plantas apresentaram dois pares de folhas, foi realizado um desbaste, permanecendo apenas uma planta por recipiente.

As análises foram realizadas quando as mudas apresentaram 150 dias após a emergência, no qual foram analisadas quatro plantas de cada repetição. As variáveis não destrutivas avaliadas foram a altura (H) (medida do nível do substrato até a gema apical, utilizando fita métrica), diâmetro (D) na altura do coleto (medido ao nível do substrato, com o auxílio de um paquímetro digital) e número de folhas (NF) (contagem manual do número de folhas por planta). Logo após, as plantas foram retiradas do recipiente e lavadas em água corrente, para serem avaliadas de modo destrutivo. Foi feito a medida do comprimento da raiz (CR), o volume radicular (VR) (por meio do deslocamento de área), e medição da área foliar (AF) e radicular (AR), por meio do escaneamento digital e análise através do software ImageJ.

Posteriormente, foi realizada a secagem e pesagem da massa seca da raiz (MSR) e da parte aérea (MSPA) (as plantas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C, por 48 h, e posterior pesagem em balança eletrônica de precisão), que foram somadas para obtenção da massa seca total (MST). Foi calculado a relação H/D e MSPA/MSR, por meio da divisão entre as variáveis. Além disso, foi avaliada a qualidade das mudas por meio do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (DICKSON et al., 1960), por meio da fórmula  $IQD = [MST / (H/D + MSPA/MSR)]$ .

Em seguida, foi realizada análise de variância (ANOVA) e análise de regressão polinomial ao nível de significância de 5% ( $p < 0,01$ ), escolhendo-se as equações significativas com maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e calculado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) ( $p < 0,05$ ) (Souza et al., 2022b). Os dados foram analisados por meio do software R Studio® versão 1.3.1073 (Team RC, 2022). Os gráficos foram desenhados no software Excel®, versão 2019, sendo o ponto máximo de cada característica avaliada calculado de acordo com o vértice da parábola da equação quadrática por meio da fórmula  $X = -b/2a$  (Souza et al., 2022b).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Houve efeito significativo entre a interação entre cultivar e o substrato, a 5% de probabilidade, para a maior parte das variáveis analisadas, dentre elas a altura, diâmetro, número de folhas, área foliar, volume radicular, massa seca da parte área, radicular e total, e o IQD (conforme Tabela 1). O comprimento da raiz e relação H/D foram significativos para o fator isolado dose, enquanto a área radicular obteve significância para os fatores cultivar e dose, isoladamente. A relação MSPA/MSR não apresentou significância.

A altura (Figura 1A) e o diâmetro de plantas (Figura 1B) apresentaram regressão quadrática significativa, com o valor máximo para mudas de citrandarin 'San Diego' (CSD) estimado nas proporções de 43,4% e 44,7% de biossólido, respectivamente, enquanto para o limoeiro cravo (LC) a dose foi de 59,4% e 55%, respectivamente. As mudas de limão cravo foram superiores estatisticamente ao CSD nas proporções acima de 50% de biossólido para a altura, sendo que o diâmetro de ambas as cultivares foram iguais somente na dose de 25%.

Tabela 1 - Resultado da análise de variância para a cultivar, dose de biossólido e interação entre a cultivar e dose para as variáveis altura, diâmetro, número de folhas (NF), comprimento de raiz (CR), volume radicular (VR), área foliar (AF), área radicular (AR), , massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST), relação altura/diâmetro (H/D), relação MSPA/MSR e índice de qualidade de Dickson (IQD)

Fator	Altura	Diâmetro	NF	CR	VR	AF	AR
<b>Bloco</b>	0,110	0,135	0,277	0,147	0,428	0,073	0,029
<b>Cultivar</b>	0,000*	0,000*	0,039*	0,557 <sup>ns</sup>	0,005*	0,000*	0,033*
<b>Dose</b>	0,000*	0,000*	0,006*	0,005*	0,000*	0,002*	0,000*
<b>C*D</b>	0,000*	0,000*	0,003*	0,259 <sup>ns</sup>	0,002*	0,000*	0,457 <sup>ns</sup>
<b>CV (%)</b>	14,01	7,37	11,07	15,00	25,12	16,79	23,6
Fator	MSPA	MSR	MST	H/D	MSPA/MSR	IQD	
<b>Bloco</b>	0,011	0,133	0,018	0,198	0,307	0,174	
<b>Cultivar</b>	0,000*	0,000*	0,000*	0,197 <sup>ns</sup>	0,056 <sup>ns</sup>	0,000*	
<b>Dose</b>	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,192 <sup>ns</sup>	0,000*	
<b>C*D</b>	0,000*	0,000*	0,000*	0,136 <sup>ns</sup>	0,419 <sup>ns</sup>	0,000*	
<b>CV (%)</b>	18,45	15,27	15,96	10,57	42,52	14,41	

\* – Significativo a 5% de probabilidade

Resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2022b) na cultura de zínia, no qual a altura da parte aérea e o diâmetro apresentou comportamento quadrático com médias crescentes até a proporção de 50,38% e 56,56% de bio sólido, respectivamente. De acordo com Silva et al. (2020), as mudas apresentam incremento na altura quando expostas a condições favoráveis de desenvolvimento, e geralmente isso ocorre devido ao aumento na produção fotossintética da planta. Entretanto, o maior crescimento da muda deve ser acompanhado pelo aumento do diâmetro do caule, pois garante maior sustentação à parte aérea da muda em formação (Cecco et al., 2018). Em geral, o diâmetro é um dos principais indicadores do potencial de resistência das mudas às condições de campo, quando são submetidas a condições adversas (Ferreira et al., 2021).

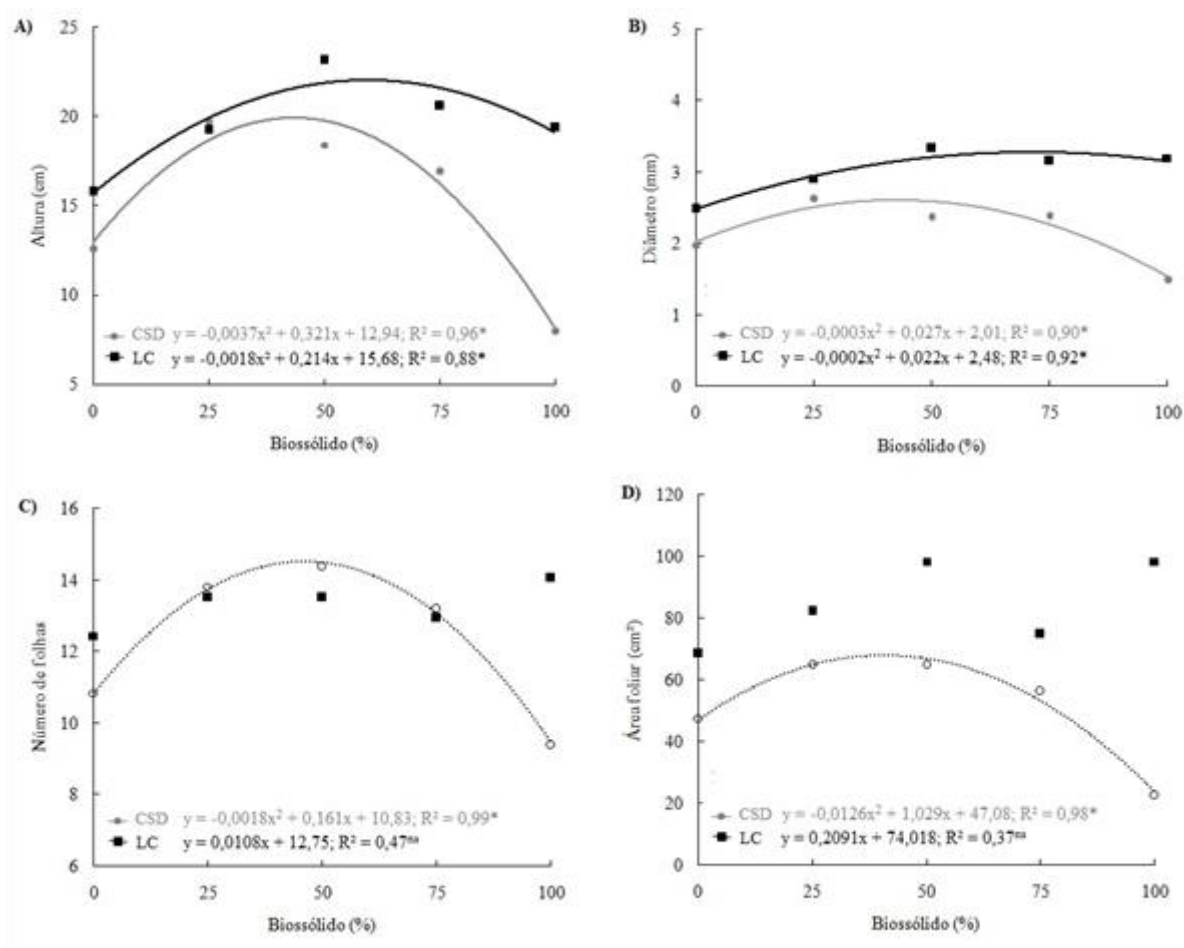


Figura 1 - Altura (A), diâmetro (B), número de folhas (C) e área foliar (D) de mudas de citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), produzidas em substratos com diferentes porcentagens de bio sólido, após 150 dias da emergência.

Resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2022b) na cultura de zínia, no qual a altura da parte aérea e o diâmetro apresentou comportamento

quadrático com médias crescentes até a proporção de 50,38% e 56,56% de bio sólido, respectivamente. De acordo com Silva et al. (2020), as mudas apresentam incremento na altura quando expostas a condições favoráveis de desenvolvimento, e geralmente isso ocorre devido ao aumento na produção fotossintética da planta. Entretanto, o maior crescimento da muda deve ser acompanhado pelo aumento do diâmetro do caule, pois garante maior sustentação à parte aérea da muda em formação (Cecco et al., 2018). Em geral, o diâmetro é um dos principais indicadores do potencial de resistência das mudas às condições de campo, quando são submetidas a condições adversas (Ferreira et al., 2021).

O número de folhas das cultivares LC e CSD foram iguais estaticamente para todas as proporções de bio sólido, exceto no 100% de substrato, no qual o LC foi superior (Figura 1C), enquanto a área foliar do LC foi superior ao CSD em todas as proporções estudadas (Figura 1D). Entretanto, o limoeiro cravo não apresentou regressão significativa para estas variáveis. Para o citrandarin, a melhor dose para essas características foi de 44,7% e 40,8% de bio sólido em relação ao substrato comercial (SC), para o NF e AF, respectivamente. Costa et al. (2023) encontram correlação positiva entre o número de folhas e o aumento da concentração de bio sólido em aceroleira. Geralmente, presume-se que o número de folhas está ligado ao desenvolvimento da planta, uma vez que as folhas são locais de fotossíntese (Taiz et al., 2021).

Em relação às cultivares, resultados semelhantes foram encontrados por Rodrigues et al. (2015) ao estudar portas-enxerto cítricos. Os autores encontraram maior altura para o limoeiro cravo e maior diâmetro para o citrandarin, enquanto o número de folhas não diferiu entre as cultivares. Além disso, encontraram maiores áreas foliares do limbo foram obtidas pelo limoeiro e seus híbridos, indicando maior habilidade desses em captar radiação solar.

O volume de raiz foi semelhante estatisticamente entre as cultivares para as doses de 0% e 25% de bio sólido no substrato, com o LC sendo superior nas demais doses (Figura 2A). O maior valor de volume radicular foi estimado na proporção de bio sólido de 41,25% e 56% para o CSD e LC, respectivamente. Esse resultado diferente do encontrado por Rodrigues et al. (2015), que observaram maior volume de raiz na cultivar CSD, no qual afirmam que esta variável é de fundamental importância na produção de porta-enxertos, pois plantas com maior abundância de raízes possuem maior chance de sucesso no transplante.

O comprimento de raiz foi significativo apenas para o fator substrato, sendo a proporção de 39,6% de bio-sólido responsável por maior tamanho radicular (18,6 cm), conforme Figura 2B. Resultados divergentes foram encontrados na literatura quando ao comprimento da raiz, no qual Souza et al. (2022a) e Ferreira et al. (2021) não observaram relação significativa com o aumento das doses. Entretanto, Siqueira et al. (2019) notaram aumento do comprimento da raiz e do volume radicular de *Plathymenia reticulata* nas doses de 20% e 40% de bio-sólido no substrato.

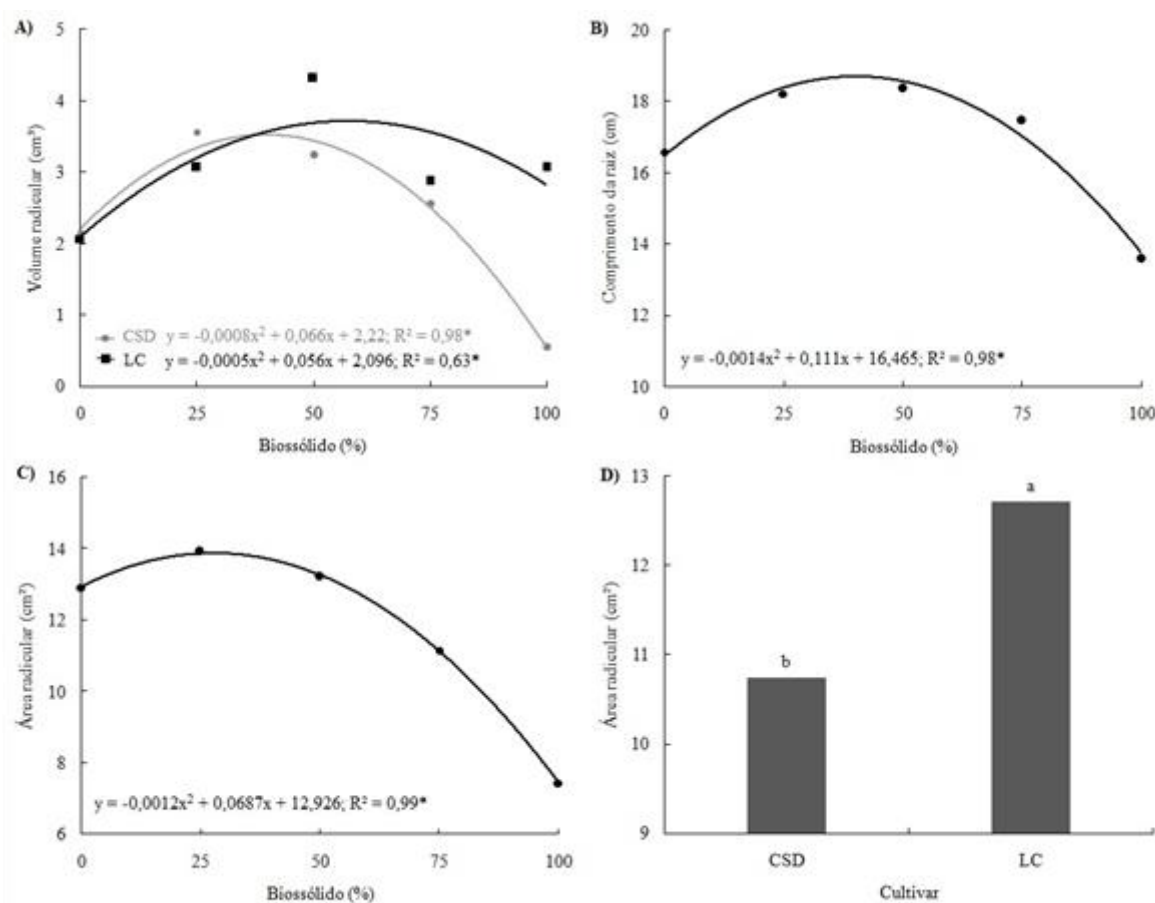


Figura 2 - Volume radicular (A), comprimento da raiz (B), área radicular em função da proporção de bio-sólido no substrato comercial (C) e em função das cultivares (D) citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), após 150 dias da emergência.

No que diz respeito a área radicular, os fatores substrato e cultivar apresentaram significância apenas quando analisados isoladamente. O substrato proporcionou maior AR na proporção de 28,3% de bio-sólido em relação ao SC (Figura 2C), enquanto o LC apresentou média superior para esta variável quando comparado ao CSD (Figura 2D). Esse resultado diferente do encontrado por

Rodrigues et al. (2015) que observaram maior área radicular no citrandarin em relação ao limoeiro cravo, com destaque para maior parte de raízes com diâmetro até um milímetro.

A relação altura/diâmetro (H/D) apresentou significância apenas para o fator substrato, com resultado superior na dose estimada de 45% de biossólido, conforme Figura 3A. Esse índice está relacionado com a robustez da muda e sua capacidade de sobreviver nas condições de campo (Ferreira et al., 2021). Segundo Carneiro (1995), a relação H/D deve situar-se entre os limites de 5,4 a 8,1. Desse modo, todas as proporções de biossólido utilizadas proporcionaram valores adequados para essa variável.

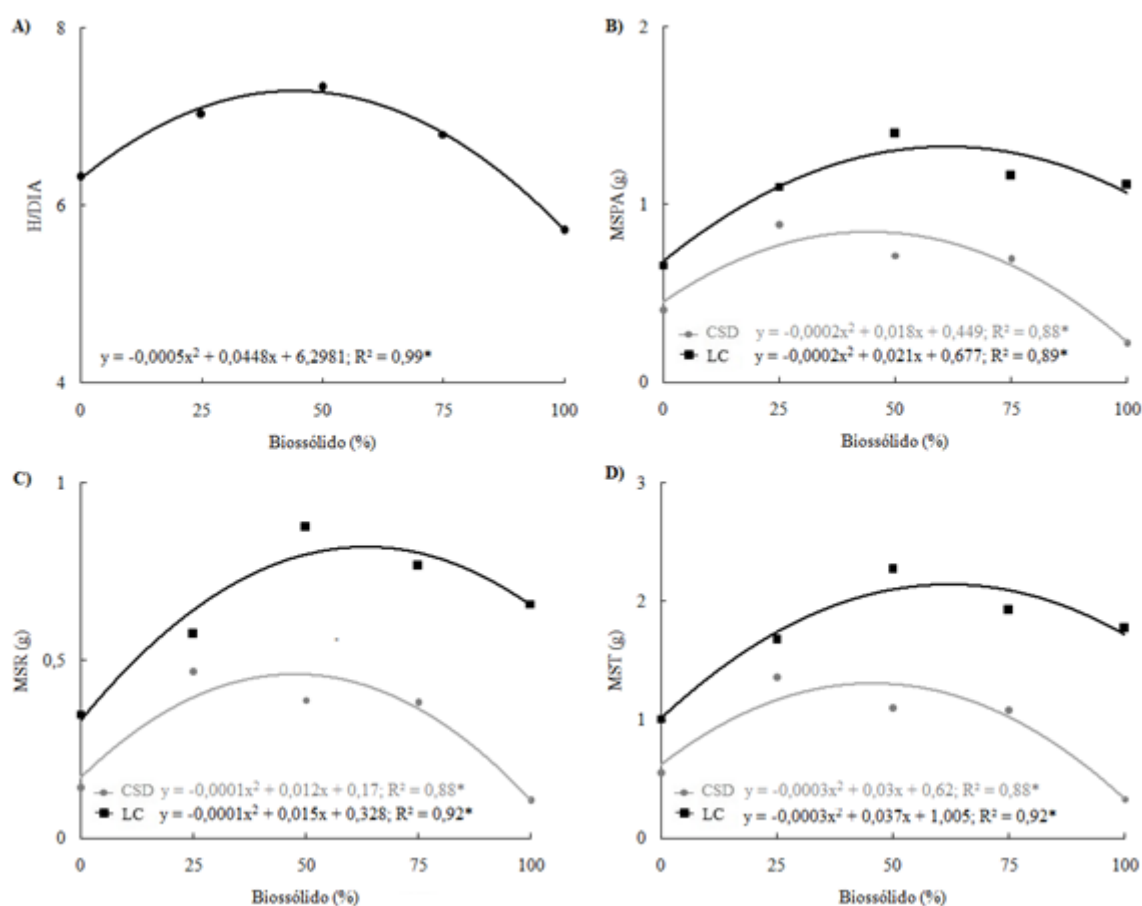


Figura 3- Relação H/D (A), massa seca da raiz (B), massa seca da parte área (C) e massa seca total (D) de mudas de citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), produzidas em substratos com diferentes porcentagens de biossólido, após 150 dias da emergência.

Em relação a massa seca da raiz, da parte área e total, as mudas de limoeiro cravo apresentaram média superior para as todas as proporções de biossólido quando

comparadas às mudas de citrandarin San Diego. O maior valor estimado para a MSR foi nas proporções de 75% e 60%, para LC e CSD, respectivamente (Figura 3B). O CSD apresentou maior MSPA na proporção de 45% de bio sólido, enquanto o LC na dose de 52,5% (Figura 3C). Os maiores valores de MST foram nas proporções de 61,7% e 33% de bio sólido em relação ao substrato comercial, para mudas de LC e CSD, respectivamente (Figura 3D).

O aumento da biomassa pode ser atribuído às condições favoráveis proporcionadas pela composição do substrato, promovendo o crescimento das raízes laterais e resultando assim em um desenvolvimento satisfatório das mudas (Costa et al., 2023). Segundo Cecco et al. (2018), o aumento da biomassa seca é consequência do maior crescimento vegetal, assim sendo, mudas que apresentam crescimento acentuado em altura e número de folhas tendem a apresentar maior massa da parte aérea. Aliado a isso, matéria seca das raízes pode determinar a sobrevivência e o estabelecimento das mudas no campo, pois acarreta maior área radicular e maior absorção de nutrientes, e conseqüentemente melhor desenvolvimento dos indivíduos no campo (Lanzetti et al., 2021).

Em geral, altas porcentagens de bio sólido no substrato tendem a aumentar a biomassa seca produzida pelas mudas no viveiro (Souza et al., 2022b). Cabeira et al. (2014), quando analisaram a massa seca de espécies florestais, observaram um aumento progressivo da biomassa das plantas a partir do acréscimo na proporção do bio sólido. Ferreira et al. (2021) observaram que, para mudas de palmeira real australiana, as melhores respostas de massa seca foram nas proporções entre 47% e 63% de bio sólido. Ao avaliar o crescimento de mudas cítricas, Rodrigues et al. (2015) observaram maiores valores de massa seca mudas de limoeiro cravo quando comparado ao citrandarin.

Para a relação MSPA/MSR, não houve resultado significativo para a interação cultivares x substrato, nem para os fatores avaliados isoladamente (Figura 4A). Abreu et al. (2019) e Siqueira et al. (2019) também não encontraram diferença entre o substrato comercial e o bio sólido para esta característica.

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD) é considerado um indicador de qualidade de mudas, no qual considera a robustez e equilíbrio da distribuição da massa na planta, ponderando os resultados de parâmetros utilizados para avaliação da qualidade da muda, dentre eles a altura, diâmetro e biomassa da parte aérea, raiz e total (Abreu et al. 2019; Medeiros et al., 2018). O IQD foi superior estatisticamente nas

mudas de limoeiro cravo, com aumento do índice até a proporção de 66,6%, enquanto mudas de CDS apresentaram maior valor na proporção de 51,6%, com posterior redução (Figura 4B). Esse resultado é corroborado por Souza et al. (2022a), no qual verificaram aumento do IQD de mudas de jerivá até a concentração de 51,38% de biossólido em relação ao substrato. Ferreira et al. (2021) observaram maior IQD na dose de 47,56% de biossólido em mudas de palmeira, enquanto Abreu et al. (2017) encontraram maior índice quando utilizado acima de 50% de biossólido em mudas de *Schinus terebinthifolia*. Cabreira et al (2017) concluíram que o tratamento com 80% de biossólido apresentaram maiores valores para as mudas de farinha seca, dedaleiro e paineira.

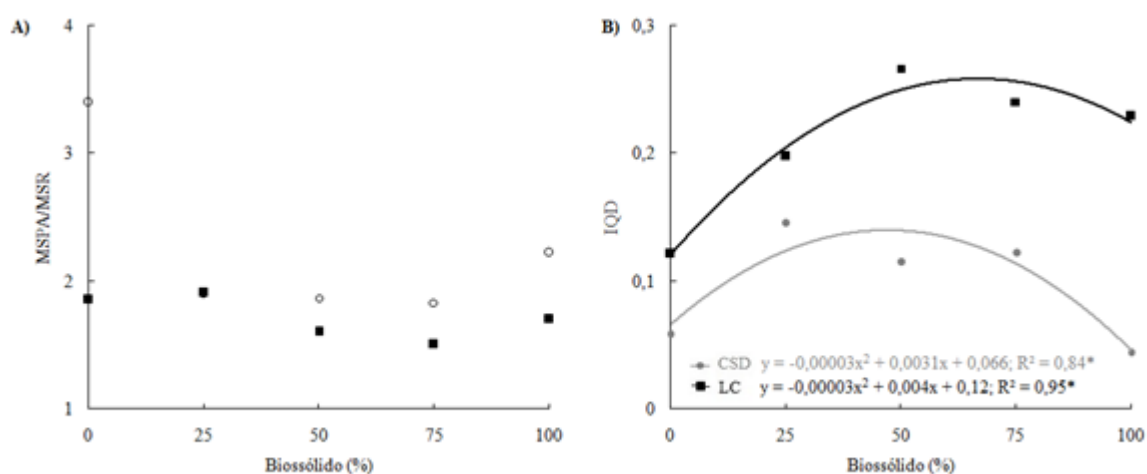


Figura 4- Relação MSPA/MSR (A) e Índice de Qualidade de Dickson (B) de mudas de citrandarin 'San Diego' (CSD) e limoeiro cravo (LC), produzidas em substratos com diferentes porcentagens de biossólido, após 150 dias da emergência.

De acordo com Faria et al. (2013) e a Costa et al. (2023), o valor considerado mínimo de IQD é de 0,20, indicando sua adequação para plantio em campo. Desse modo, apenas o limoeiro cravo quando submetido às proporções de biossólido acima de 24,5% apresentaram o valor indicado. Para o CSD, nenhuma dose proporcionou IQD acima de 0,2 no período avaliado.

O comportamento quadrático obtido pelas variáveis analisadas no experimento pode ser explicado pelas características químicas e físicas do substrato. O maior crescimento das mudas submetidos aos tratamentos à base do biossólido está associado à presença de nutrientes, o que proporciona melhor nutrição e desenvolvimento das mudas (Souza et al., 2022b). Segundo Faria et al. (2013), o menor valor para as características morfológicas das mudas cultivadas apenas em

substrato comercial pode estar relacionado aos baixos níveis de N e P desse material, principalmente em relação ao bio sólido.

Entretanto, isso ocorre até determinado limite, pois altas concentrações de bio sólido pode reduzir a aeração do substrato, devido seu baixo teor de macroporosidade (Abreu et al., 2017). Em geral, à medida que a porcentagem de bio sólido aumenta no substrato, ocorre aumento da densidade aparente e da microporosidade, com redução da macroporosidade (Caldeira et al., 2018). Além disso, pode ocorrer um aumento dos teores de elementos traços e micronutrientes no substrato, que quando presentes em concentrações acima da exigência das plantas, passam ter efeitos fitotóxicos, prejudicando o desenvolvimento das espécies vegetais (Freitas; Alvarenga; Durães, 2019) Desse modo, os melhores resultado em substrato acrescido com bio sólido vem do equilíbrio entre a macroporosidade, atributo conferido pelo SC, e o teor de nutrientes advindo do bio sólido (Lanzetti et al., 2021).

A diferença entre o desempenho entre as cultivares limoeiro cravo ‘Santa Cruz’ e citrandarin ‘San Diego’ é devido as diferenças genéticas. De acordo com o Fundecitrus (2022), o LC apresenta alto vigor na fase de viveiro, enquanto CSD apresenta vigor intermediário. Abreu et al. (2017) observaram diferença dos resultados entre espécies florestais devido à interação entre as características químicas e físicas dos substratos com a ecologia das espécies. De acordo com Gomes et al. (2019), os principais parâmetros morfológicos de crescimento de mudas são influenciados tanto por fatores genéticos quanto ambientais. Desse modo, diferentes espécies requerer composições diferentes de substratos para atingir seu máximo desenvolvimento e crescimento.

#### **4. CONCLUSÃO**

O uso de bio sólidos em proporções específicas (até 60% para o limoeiro Cravo e até 45% para o citrandarin) mostrou melhorias no crescimento inicial e na qualidade das mudas. A interação entre o tipo de porta-enxerto e a proporção de bio sólido no substrato foi significativa para a maioria das variáveis de crescimento e qualidade das mudas, com o limoeiro Cravo apresentando maior vigor durante o período experimental.

O uso de biossólidos diminui custos associados à aquisição de substratos e oferece uma solução sustentável para o reaproveitamento de resíduos, reduzindo impactos ambientais. Apesar dos benefícios, o manejo cuidadoso do substrato é necessário para evitar limitações físicas ou químicas que possam comprometer o desenvolvimento das plantas.

## 5. REFERÊNCIAS

ABREU, A. H. M.; LELES, P. S. S.; MELO, L. A.; OLIVEIRA, R. R.; FERREIRA, D. H. A. A. Caracterização e potencial de substratos formulados com biossólido na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi. e *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p.1179-1190, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509830300>

ABREU, A. H. M.; ALONSO, J. M.; MELO, L. A.; LELES, P. S. S., SANTOS, G. R. Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 24, p. 591-599, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019108265>

BOWMAN; K. D., JOUBERT, J. CHAPTER 6: CITRUS ROOTSTOCKS. *In*: TALON, M.; CARUSO, M.; GMITTER JR., F. G. **The Genus Citrus**. 2020, Pages 105-127. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812163-4.00006-1>

CABREIRA, G. V.; LELES, P. S. S.; ALONSO, J. M.; ABREU, A. H. M.; LOPES, N. F.; SANTOS, G. R. Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 2, p, 165-176, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv47i2.44291>

CALDEIRA, M. V.; SANTOS, F. E.; KUNZ, S. H.; KLIPPEL, V. H.; DELARMELINA, W. M.; GONÇALVES, E. O. Solid urban waste in the production of *Aegiphila sellowiana* Cham. seedlings. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, Campina Grande, v. 22, n. 12, p. 831-836, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p831-836>

CARNEIRO, J. G. A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 451 p. 1995.

CARVALHO, H. W. L.; CARVALHO, L. M.; BARROS, I.; TEODORO, A. V.; GIRARDI, E. A.; PASSOS, O. S.; SOARES FILHO, W. S. Productive performance of 'Pera' sweet orange grafted onto 37 rootstocks in tropical cohesive soils under rainfed condition. **Sci. Hortic.**, Amsterdam, v. 303, p. 111229, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111229>

CECCO, R. M. D.; KLOSOWSKI, E. S.; SILVA, D. F. D.; VILLA, F. Germinação e crescimento inicial de mudas de espécies não convencionais de fisálias em diferentes

substratos e ambientes. **Rev. Ciênc. Agrovet.**, Lages, v. 1, n. 1, p. 45-53, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711712018045>

COLLIVIGNARELLI, M. C.; ABBÀ, A.; BENIGNA, I. The reuse of biosolids on agricultural land: Critical issues and perspective. **Water Environ. Res.**, Hoboken , v. 92, n. 1, p.11-25, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1196>

COSTA, A. L.; DINIZ , A. A. P.; SOUZA, L. C.; VESTENA, S. Proportions of sewage sludge in the production and quality of *Malpighia emarginata* DC. seedlings. **Braz. J. Biol.**, São Carlos, v. 83, p. e274643, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.274643>;

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **For. Chron.**, Ottawa, v. 36, p. 10-13, 1960.

FAGUNDES, M. C. P.; CRUZ, M. C. M.; CARVALHO, R. P.; OLIVEIRA, J.; SOARES, B. C. Polímero hidroabsorvente na redução de nutrientes lixiviados durante a produção de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.1, p. 121-129, 2015

FARIA, J. C. T.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELENA, W. M.; GONÇALVES, E. O. Uso de resíduos orgânicos no crescimento de mudas de *Mimosa setosa*. **Pesqui. Florest. Bras.**, Colombo, v. 33, n. 76, p. 409-418, 2013

FERREIRA, K. B.; SOUZA, A. M. B.; MUNIZ, A. C. C.; FERREIRA, N. B.; PIVETTA, K. F. L. Biossólido na produção de mudas de palmeira real australiana. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.10, n. 2, p. 58-66, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v10i2.27048>

FREITAS, A. R.; LOPES, J. C.; ALEXANDRE, R. S.; VENANCIO, L. P.; ZANOTTI, R. F. Emergência e crescimento de mudas de maracujá doce em função de substratos e luz. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 6, n. 2, p. 234-240, 2015.

FREITAS, D. A.; ALVARENGA, A. C.; DURÃES, A. F. S. Adição de lodo de esgoto ao substrato comercial para produção de mudas de espécies florestais. **Brazilian Journal of Animal Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 2, n. 5, p. 1760-1767, 2019.

Fundecitrus - Fundo de Defesa da Citricultura. **Características de porta-enxertos com uso comercial e potencial no cinturão citrícola de SP E MG**. Araraquara: Fundo de Defesa da Citricultura; 2022, 1p. Disponível em: [https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/manual\\_detalhes/poster-de-porta-enxertos/92](https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/manual_detalhes/poster-de-porta-enxertos/92).

GOMES, S. H. M.; GONÇALVES, F. B.; FERREIRA, R. A.; PEREIRA, F. R. M.; RIBEIRO, M. M. J. Avaliação dos parâmetros morfológicos da qualidade de mudas de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil) em viveiro florestal. **Scientia Plena**, v. 15, n.1, p. 011701, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.011701>

JATAV, S. S.; SINGH, S. K.; PATRA, A.; JATAV, H. S.; MOHOPATRA, K. K.; SINGH, P. Characterization of sewage sludge for quality assessment and its safe utilization in agriculture. **Current Journal of Applied Science and Technology**. v. 40, n.25, p. 28-35, 2021. DOI: <https://doi.org/10.9734/cjast/2021/v40i2531511>

LANZETI, N. G. A. A.; CHIMINI, A.C.; NETO, M.S.; PAZ, M. F.; SIQUEIRA, M. V. B. M. Lodo de esgoto compostado e diferentes lâminas de irrigações no desenvolvimento de *Acacia polyphylla*. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 9, n. 2, p. 201-211, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v9n2.lanzeti>

MAPA - Ministério da Agricultura e Pecuária. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária; 2017. 240 p.

MEDEIROS, M. B. C. L.; JESUS, H. I.; SANTOS, N. F. A.; MELO, M. R. S.; SOUZA, V. Q.; BORGES L. S.; GUERREIRO, A. C.; FREITAS, L. S. Índice de qualidade de dickson e característica morfológica de mudas de pepino, produzidas em diferentes substratos alternativos. **Agroecossistemas**, Belém, v. 10, n. 1, p. 159-173, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v10i1.5124>

MUTER, O.; DUBOVA, L.; KASSIEN, O.; CAKANE, J.; ALSINA, I. Application of the sewage sludge in agriculture: soil fertility, techno-economic, and life-cycle assessment. 2022. In: Jeyakumar, R. B.; Sankarapandian, K.; Ravi, Y. K. **Hazardous Waste Management**. London: IntechOpen; DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.104264>

RODRIGUES, M. J. S.; LEDO, C. A. S.; GIRARDI, E. A.; ALMEIDA, L. A. H.; SOARES FILHO, W. S. Caracterização de frutos e propagação de porta-enxertos híbridos de citros em ambiente protegido. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 37, n. 2, p. 457-470, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-2945-068/14>

SOMBRA, K. E. S.; COSTA, A. C.; SILVA F. L. C. L.; ANDRADE, H. M.; BASTOS, D. C.; UCHÔA, C. N. Emergência e desenvolvimento inicial de porta-enxertos de citros no semiárido do Ceará, Brasil. **Citrus Res. Technol.**, Cordeirópolis, v. 40, p. e1042, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/crt.00162>

SOUZA, F. E. C.; NATALE, W.; BRAGA, M. M.; MESQUITA, R. O.; COSTA, R. S. Growth and accumulation of nutrients in papaya tree seedlings grown on organic substrates. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 68, p. 267-275, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168040003>

SOUZA, A. M. B.; CHIODA, L. B.; FERREIRA, K. B.; VIEIRA, G. R.; CAMPOS, T. S.; PIVETTA, K. F. L. Initial growth of *Syagrus romanzoffiana* seedlings in biosolid-based substrate. **Pesqui. Agropecu. Trop.**, Goiânia, v. 52, e70577, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5270577>

SOUZA, A. M. B.; VIEIRA, G. R.; SGOBBE, G.; FERREIRA, K.B.; CAMPOS, T. S.; PIVETTA, K. F. L. Initial growth of zinnia seedlings in substrate with different

proportions of biosolid. **Ornam. Hortic.**, Viçosa, v. 28, n. 2, p.220-229, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v28i2.2482>

Team RC. A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2022.

VIÇOSI, K. A.; GARCIA, G. O. Uso do biossólido como substrato para a produção de mudas. 2022. *In*: ZUFFO, A. M.; AGUILERA, J. G. **Pesquisas agrárias e ambientais**: Volume XI. Nova Xavantina, MT: Pantanal Editora, 2022, p. 103-111. DOI: <https://doi.org/10.46420/9786581460419cap9>

SILVA, D. F.; VILLA, F.; PIVA, A. L.; KLOSOSWIKI, E. S.; MEZZALIRA, E. J. Emergência e desenvolvimento de mudas de fisális sob telas de sombreamento coloridas e pleno sol. **Rev. Ciênc. Agrov.**, Lages, v. 19, n. 2, p.139-148, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711922020139>

SIQUEIRA, D. P.; BARROSO, D. G.; CARVALHO, G. C. M. W.; ERTHAL, R. M.; RODRIGUES, M. C. C.; MARCIANO, C. R. Lodo de esgoto tratado na composição de substrato para produção de mudas de *Plathymenia reticulata* Benth. **Ciênc. Florest.**, Lages, v. 29, n. 2, p. 728-739, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509827297>

### ARTIGO III: ADUBAÇÃO COM BIOSÓLIDO E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO CULTIVADO COM LARANJEIRA PÊRA

**Resumo:** Por conter nutrientes e matéria orgânica, o bio sólido tem potencial para ser utilizado como adubo orgânico na agricultura, em especial em culturas perenes, como na laranjeira. Assim, o trabalho objetiva a avaliação dos atributos químicos do solo cultivados com laranja e adubados com bio sólido em seus dois primeiros anos de plantio. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com seis tratamentos de oito plantas. Os tratamentos foram baseados na fonte de adubação e sua dose: T0- 100% da dose recomendada proveniente da adução mineral (AM); T1- 50% AM e 50% bio sólido (AM + B); T2- 100% bio sólido (100 B); T3- 115% bio sólido (115 B); T4- 130% bio sólido (130 B) e T5- 150% bio sólido (150 B). A cultivar utilizada foi a Pêra D6, enxertada sobre Citrandarim Índio. Cada tratamento foi composto por uma fileira de oito plantas por linha, sendo avaliadas as quatro plantas centrais. As coletas de solo foram realizadas aos 03, 09, 15 e 21 meses após o plantio. Os dados coletados foram submetidos pela análise de variância e teste de médias quando significativo. Bio sólidos nas doses de 100%, 115% e 150% aumentaram significativamente os teores de fósforo, cálcio e a soma de bases no solo. Isso demonstra que a aplicação de bio sólido pode melhorar a fertilidade do solo em comparação com adubação exclusivamente mineral. A adubação com bio sólido não proporcionou aumento nas quantidades de micronutrientes e metais pesados no solo (como Cu e Zn), que permaneceram dentro dos limites seguros para uso agrícola. Desse modo, o uso de bio sólido pode ser uma alternativa viável e sustentável à adubação mineral, desde que se respeitem as normas legais e se faça um monitoramento constante para evitar a contaminação do solo. A boa gestão da aplicação de lodo de esgoto é crucial para garantir a sustentabilidade e maximizar os benefícios dessa prática agrícola.

**Palavras-chave:** *Citrus sinensis* (L.) Osbeck, fertilidade do solo, micronutrientes, lodo de esgoto

**Summary:** Due to its nutrient and organic matter content, biosolid has the potential to be used as an organic fertilizer in agriculture, especially in perennial crops such as orange trees. Thus, this study aims to evaluate the chemical attributes of soil cultivated with orange trees and fertilized with biosolid in their first two years of planting. The experimental design used was completely randomized, with six treatments of eight plants each. The treatments were based on the source of fertilizer and its dose: T0- 100% of the recommended dose from mineral fertilization (MF); T1- 50% MF and 50% biosolid (MF + B); T2- 100% biosolid (100 B); T3- 115% biosolid (115 B); T4- 130% biosolid (130 B) and T5- 150% biosolid (150 B). The cultivar used was Pera D6, grafted onto Citrandarim Índio. Each treatment consisted of a row of eight plants per line, with the four central plants being evaluated. Soil samples were collected at 03, 09, 15, and 21 months after planting. The collected data were subjected to analysis of variance and mean test when significant. Biosolids at doses of 100%, 115%, and 150% significantly increased the levels of phosphorus, calcium, and the sum of bases in the soil. This demonstrates that the application of biosolid can improve soil fertility compared to exclusively mineral fertilization. Biosolid fertilization did not increase the amounts of micronutrients and heavy metals in the soil (such as Cu and Zn), which remained within safe limits for agricultural use. Thus, the use of biosolid can be a viable

and sustainable alternative to mineral fertilization, as long as legal norms are respected and constant monitoring is carried out to prevent soil contamination. Proper management of sewage sludge application is crucial to ensure sustainability and maximize the benefits of this agricultural practice.

**Keywords:** *Citrus sinensis* (L.) Osbeck, soil fertility, micronutrients, sewage sludge

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de lodo de esgoto como fertilizante orgânico em áreas agrícolas tem sido incentivado em diversos países devido aos benefícios que pode trazer ao solo (da Silva et al., 2021). Além disso, os bio sólidos têm sido eficazes no aumento de uma série de atributos agromorfológicos, bem como no rendimento em diferentes espécies de culturas (Delibacak et al., 2020). No geral, a sua aplicação no solo é uma alternativa agrícola promissora para melhorar a fertilidade e é uma prática sustentável para a reciclagem deste que é subproduto do tratamento do esgoto (Achkir et al., 2023), além de contribuir para a adoção de práticas de cultivo conservacionistas (Pegoraro et al., 2024).

A utilização do bio sólido na baseia principalmente em seu potencial de ser utilizado como adubo orgânico no solo. O seu alto potencial de fertilização é devido à grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio, fósforo e micronutrientes, que são úteis tanto para o solo quanto para as plantas (Delibacak et al., 2020). Além disso, a aplicação de bio sólido pode ser uma alternativa barata e eficaz para substituir os fertilizantes químicos e desempenha um papel importante na melhoria das propriedades físico-químicas e biológicas do solo (Achkir et al., 2023; Li et al., 2024).

Por outro lado, o uso agrícola de bio sólidos ainda apresenta limitações relevantes, como a presença de elementos nocivos, que podem estar presentes em sua composição, e da toxicidade, persistência no solo e exposição a longo prazo (Amorim Junior et al., 2021). Assim, o uso de bio sólidos para a agricultura comercial deve ser feito com cautela, pois muitas vezes pode conter resíduos de metais tóxicos, e o seu indiscriminado pode ser prejudicial à produtividade do solo e à cadeia alimentar (Delibacak et al., 2020).

A aplicação de bio sólido tem sido estudada em algumas culturas, dentre eles florestais, como eucalipto (Bonini et al., 2015; Florentino et al., 2019); agrícolas, como

milho (G. H. M. C. Silva et al., 2024; Yada et al., 2020) e soja (Freiberger et al., 2020). Contudo, o biofóssido tem potencial para ser utilizado também em frutíferas, dentre elas laranjeira. De acordo com a Embrapa (2023), a cultura ocupa uma área de 568 mil hectares, e uma produção nacional de aproximadamente 17 milhões de toneladas. Nesse contexto, a utilização de lodo de esgoto na citricultura pode representar uma alternativa de adubação sustentável para a cadeia produtiva. Assim, o trabalho objetiva a avaliação dos atributos químicos do solo cultivados com laranja e adubados com biofóssido em seus dois primeiros anos de plantio.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 LOCAL

O experimento foi conduzido na área experimental do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAEE-UFES), localizado no município de Alegre-ES (20°45'06.9"S e 41°29'14.7"W), durante o período de dezembro de 2021 a novembro de 2023. O clima da região é considerado tipo "Cwa", isto é, tropical quente úmido, com inverno frio e seco, temperatura anual média de 23,1 °C e precipitação total anual média de 1341 mm (Lima et al., 2008), sendo as condições climáticas do período experimental descritas na Figura 1.

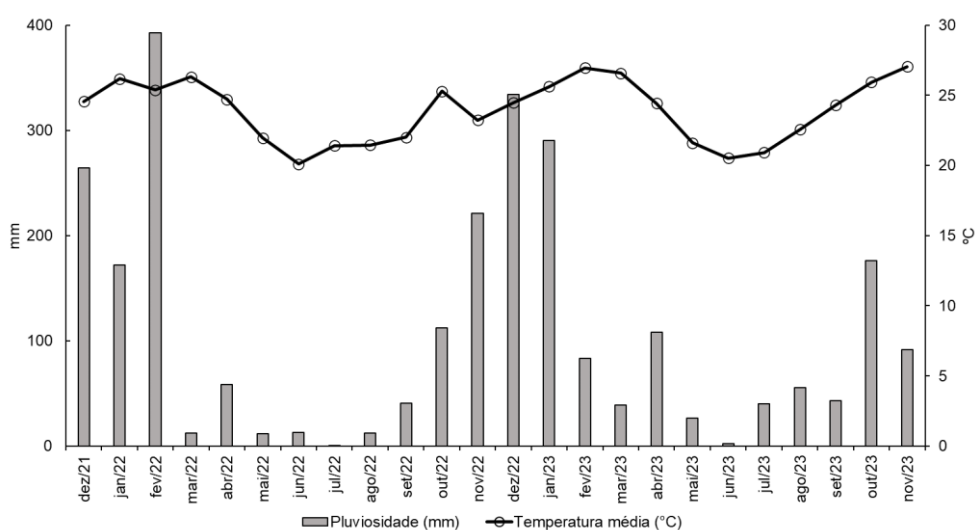


Figura 1 - Médias mensais de temperatura e pluviosidade em Alegre-ES, durante o período de dezembro de 2021.  
Fonte: INMET (2024).

## 2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, composto de seis tratamentos de oito plantas. Os tratamentos foram baseados na fonte de adubação e sua dose: T0- 100% da dose recomendada proveniente da adução mineral (AM); T1- 50% AM e 50% biossólido (AM + B); T2- 100% biossólido (100 B); T3- 115% biossólido (115 B); T4- 130% biossólido (130 B) e T5- 150% biossólido (150 B). A quantidade de biossólido aplicada foi baseada no nutriente com maior concentração, ou seja, o nitrogênio, e calculada de acordo com a necessidade da cultura (Prezotti et al., 2007).

A cultivar utilizada foi a Pera D6, enxertada sobre Citrandarim Índio. Foi adotado espaçamento de 4,5 x 2,3 m, entre fileiras e entre plantas, respectivamente. Cada tratamento foi composto por uma fileira de oito plantas por linha, no qual foram avaliadas apenas as quatro plantas centrais.

## 2.3 BIOSSÓLIDO

O lodo de esgoto foi coletado no leito de secagem da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), localizado em Jerônimo Monteiro-ES (20°47'19.3"S e 41°23'50.4"W). No local, o lodo foi tratado através de secagem em leitos de areia e em bacias de solarização. As análises foram realizadas em laboratório da área experimental do CCAE-UFES. As características do lodo de esgoto estão descritas na Tabela 1, analisados de acordo com metodologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2017).

O biossólido ainda sofreu aplicação de cal virgem, na dose de 72 kg m<sup>-3</sup>, no qual foi novamente umedecido. O material foi seco ao ar livre e armazenado em sacos de rafia.

## 2.4 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O solo da região é caracterizado como Latossolo vermelho-amarelo, cuja análise do solo está descrita na Tabela 2, analisado de acordo com a metodologia de

Teixeira et al. (2017). Com base no resultado, foram definidas as doses de adubos a serem aplicados baseados no Manual de Recomendação de Calagem e Adubação do Estado do Espírito Santo (Prezotti et al., 2007) para a cultura dos citros.

Tabela 1 - Características físico-químicas do lodo de esgoto proveniente da ETE de Jerônimo Monteiro-ES.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Umidade (%)	35,42	Potássio (%)	0,75
pH (CaCl <sub>2</sub> )	6,00	Cálcio <sup>3</sup> (%)	1,33
CTC (cmol kg <sup>-1</sup> )	47,00	Magnésio <sup>3</sup> (%)	0,33
Matéria orgânica (%)	68,38	Enxofre <sup>3</sup> (%)	0,93
Carbono orgânico <sup>1</sup> (%)	35,79	Ferro <sup>3</sup> (%)	1,45
Nitrogênio <sup>2</sup> (%)	3,39	Zinco <sup>3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	491,7
Relação C/N	11/1	Cobre <sup>3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	147,5
Fósforo <sup>3</sup> (%)	1,48	Manganês <sup>3</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	28,4

<sup>1</sup>Oxidação com Bicromato de potássio; <sup>2</sup>Digestão sulfúrica; <sup>3</sup>Digestão nitro-perclórica.

Tabela 2 - Características físico-químicas do solo utilizado no experimento

<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>	<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
pH (H <sub>2</sub> O)	5,88	H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	3,63
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,80	SB (cmolc dm <sup>-3</sup> )	3,30
Na (mg dm <sup>-3</sup> )	2,70	t (cmolc dm <sup>-3</sup> )	3,30
K (mg dm <sup>-3</sup> )	233,2	T (cmolc dm <sup>-3</sup> )	6,93
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	1,83	V (%)	47,59
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,86	M (%)	0,00
Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,00	MO (mg kg <sup>-1</sup> )	24,2

SB : Soma de bases trocáveis; t: Capacidade de troca catiônica efetiva; m: Índice de saturação em alumínio; T : Capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC); V : Índice de saturação em bases.

Na ocasião do plantio (dezembro de 2021), foi feita a adubação com fósforo (MAP) nos tratamentos T0 e T1, além de ter sido realizada a calagem para correção de acidez para elevação do índice de saturação em bases para 70%. Além disso, foi feita adubação com nitrogênio (ureia) em cobertura de forma parcelada. Os

tratamentos compostos apenas por biossólido (T2, T3, T3 e T5) não receberam calagem devido ao fato do biossólido ter passado pelo processo de caleação, sendo somente realizada a adubação com biossólido no plantio. A quantidade de nutrientes aplicado em cada tratamento, por planta, no primeiro ano, foi: T0 – 70 g de  $P_2O_5$  e 100 g de N; T1- 35 g de  $P_2O_5$ , 50 g de N e 1,2 kg de biossólido; T2- 2,5 kg de biossólido; T3- 2,9 kg de biossólido; T4- 3,25 kg de biossólido e T5- 3,75 kg de biossólido.

No segundo ano, a aplicação de biossólido foi aplicada em cobertura e em duas parcelas (outubro e dezembro de 2022), enquanto a adubação mineral foi dividida em quatro aplicações, no período chuvoso (10/2022 a 02/2024), conforme Figura 2. Foram aplicados, por planta, em T0- 220 g de N, 160 g de  $P_2O_5$  g de N e 50 g de  $K_2O$ ; T1- 110 g de N, 80 g de  $P_2O_5$ , 18 g de  $K_2O$  e 3,3 kg de biossólido; T2- 6,7 kg de biossólido e 15 g de  $K_2O$ ; T3- 7,7 kg de biossólido e 12 g de  $K_2O$ ; T4- 8,7 kg de biossólido e 10 g de  $K_2O$ ; e T5- 10,5 kg de biossólido e 8 g de  $K_2O$ . O potássio foi utilizado para suplementar o baixo teor do nutriente no biossólido, sendo que a utilizada foi o cloreto de potássio.

O experimento foi irrigado conforme necessidade da cultura e da evapotranspiração da região. O controle do mato foi realizado por meio de capina manual e aplicação de herbicida quando necessário, enquanto o manejo de pragas e doenças foi feito por aplicação de produtos biológicos.

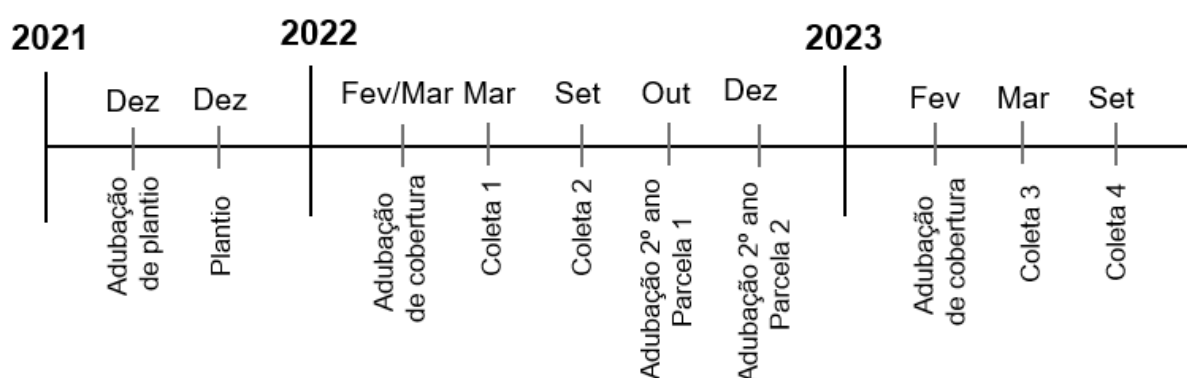


Figura 2 - Linha do tempo do experimento.

## 2.5 COLETAS E ANÁLISE

Foi coletado o solo da profundidade de 0-30 cm ao redor da copa das quatro plantas centrais de cada tratamento. A primeira coleta de solo foi realizada após três meses do plantio. A segunda, terceira e quarta coleta foram realizadas a cada seis

meses, sendo então aos 09, 15 e 21 meses após o plantio, respectivamente (Figura 2).

As amostras foram levadas para o Laboratório de Análise Rotina de Solo da UFES, onde foram feitas as análises de acordo com a metodologia de Teixeira et al., (2017). O pH foi realizado através da relação solo-água 1:2,5; P por extrator Mehlich<sup>-1</sup> e determinação por colorimetria; Na e K pelo extrator Mehlich<sup>-1</sup> e determinação por fotometria de chama; Ca e Mg com extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup> e determinação por espectrometria de absorção atômica; Al pelo extrator KCl 1mol L<sup>-1</sup> e determinação por titulometria; H+Al por meio do extrator Acetato de Cálcio 0,5mol L<sup>-1</sup> pH 7,0 e determinação por titulometria; os micronutrientes Fe, Cu, Zn e Mn por extrator Mehlich<sup>-1</sup> e determinação por espectrometria de absorção atômica e o B por extração por água quente e determinação por colorimetria.

## 2.6 ESTATÍSTICA

Os dados coletados foram submetidos pela análise de variância. Quando a interação foi significativa a 5%, ou a variável isolada adubação, foi realizado o teste de médias de Scott-Knott. Quando o tempo de coleta foi significativo isoladamente, foi feito o teste de equação de primeiro e segundo grau. Além disso, foi feita a correlação. Todas as análises foram realizadas no software R Studio (Ferreira et al., 2021).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta o resultado na análise de variância para os atributos do solo em função do tempo de coleta, tipo de adubação e sua interação. Os valores de sódio, potássio, magnésio, alumínio e saturação por alumínio (M) apresentaram interação significativa a 5% de probabilidade entre a coleta e a adubação. Para os parâmetros pH, P, Ca, H + Al, SB, t, V, m e Zn, os fatores individuais coleta e adubação foram significativos. Para a CTC, Fe, Cu e Mn, apenas a adubação foi significativa, enquanto o boro apresentou significância para a coleta.

Tabela 3 -Valores de F para análise de variância, a 5% de probabilidade.

	<b>pH</b>	<b>P</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>MO</b>
<b>Coleta</b>	9,95*	8,91*	106,09*	1,17	11,00*	4,149 *	12,32*
<b>Adubação</b>	4,27*	5,23*	8,41*	1,01	3,70*	7,98*	1,90
<b>C*A</b>	1,43	1,61	2,98*	3,69*	1,20	2,06*	1,81
<b>CV (%)</b>	8,68	76,6	43,01	30,72	39,17	17,82	24,66
	<b>Al</b>	<b>H + Al</b>	<b>SB</b>	<b>t</b>	<b>CTC</b>	<b>V</b>	<b>m</b>
<b>Coleta</b>	15,57*	6,38*	9,52*	8,69*	2,18	8,43*	13,17 *
<b>Adubação</b>	14,37*	3,23*	4,89*	4,49*	9,83*	3,12*	11,90*
<b>C*A</b>	7,17*	1,58	1,35	1,46	1,73	1,41	5,61*
<b>CV (%)</b>	120,6	39,85	27,4	26,08	10,58	25,07	133,45
	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>B</b>		
<b>Coleta</b>	1,18	0,82	7,11*	0,34	6,26*		
<b>Adubação</b>	3,64*	10,44*	2,65*	22,55*	1,30		
<b>C*A</b>	0,48	1,39	1,68	0,58	1,70		
<b>CV (%)</b>	31,95	19,73	93,41	31,70	143,45		

MO: matéria orgânica; SB: soma de bases trocáveis; t: capacidade de troca catiônica efetiva, CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: índice de saturação por bases; m: índice de saturação por alumínio.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

É possível observar que a adução mineral + biofóssido apresentou menor valor de pH e alto teor de H + Al (Figura 3A e 3D). Quando comparado ao pH inicial do solo (5,88), é possível observar que apenas o tratamento com AM + B reduziu o valor, enquanto os demais tratamentos apresentaram médias próximas ou até superior ao valor inicial.

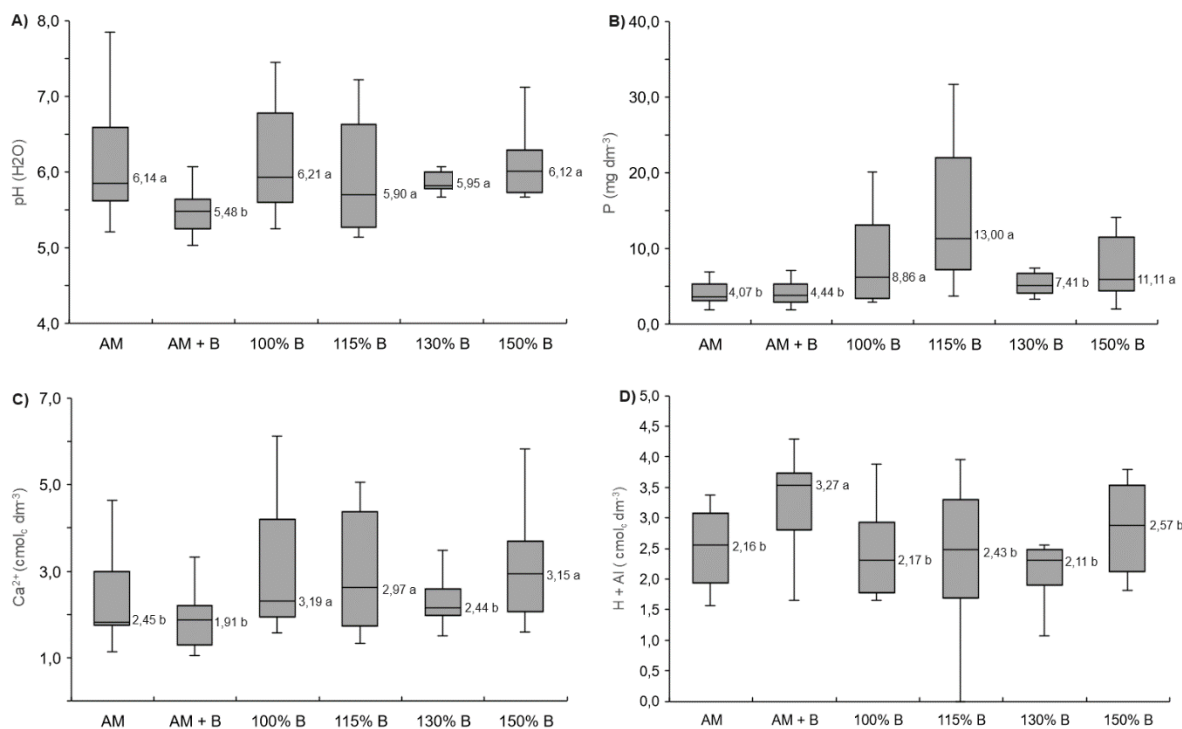


Figura 3 - Valores de pH, fósforo, cálcio e H+Al no solo de acordo com a adubação. AM: adubação mineral, AM + B: adubação mineral + biossólido, B: biossólido.

Letras iguais minúsculas em cada gráfico representam médias iguais para o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O pH do solo é uma característica química que está relacionada com a disponibilidade de nutrientes do solo. Em solos ácidos, ocorre diminuição na disponibilidade de nutrientes como fósforo, cálcio, magnésio, potássio e molibdênio e aumento da solubilização de íons como zinco, cobre, ferro, manganês e alumínio (Velooso et al., 2020). De acordo com Prezotti e Martins (2013), pH dos solos entre 5,5 a 6,5 é o ideal para a maioria das culturas, pois apresenta ausência de alumínio tóxico ( $Al^{3+}$ ), boa disponibilidade de boro e disponibilidade intermediária dos demais micronutrientes. Além disso, ocorre maior disponibilidade de macronutrientes nessa faixa de pH.

O uso de cal virgem (CaO) para estabilização química do lodo pode elevar o pH e contribuir para neutralizar a acidez do solo e diminuir a disponibilidade de Al no solo (Silva, da et al., 2021). Entretanto, esta variação de pH em solos com aplicação de biossólido depende de várias condições, incluindo a quantidade de lodo aplicada, a sua qualidade, as características do solo e as condições de mineralização (Achkir et al., 2023).

Os teores de fósforo e cálcio foram estatisticamente superiores nos tratamentos com 100%, 115% e 150% da dose recomendada de biofósforo, conforme Figura 3B e 3C. Entretanto, todos os tratamentos adubados somente com biofósforo (incluindo o 115%) apresentam média maior que o valor de P inicial do solo ( $5,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), o que representa um aumento de 27,7%, 52,7%, 91,3% e 124% para os tratamentos T2, T3, T4 e T5, respectivamente. O biofósforo é conhecido pela sua fonte significativa de P, que quando associado a redução da acidez do solo, aumenta a sua disponibilidade para as plantas (Silva et al., 2024). Em estudo de Breda et al. (2020), o biofósforo promoveu aumento do fósforo disponível no solo de acordo com a taxa de aplicação, enquanto a adubação mineral resultou em baixa disponibilidade do elemento no solo.

Em relação ao cálcio, todos os tratamentos apresentaram valores superiores ao início do experimento ( $1,83 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Isso pode ser explicado devido ao fato do tratamento somente com adubação mineral ter sido submetido à calagem, cuja fonte é o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e o biofósforo ter sofrido calcinação com cal virgem ( $\text{CaO}$ ). No solo, esses compostos se dissociam na presença de água, formando íon  $\text{Ca}^{2+}$ . Achkir et al. (2023) observaram que o teor de Ca aumentou significativamente com as percentagens de lodo adicionado, e Bonini et al. (2015) verificaram que dose de  $60 \text{ t ha}^{-1}$  apresentou teor maior de cálcio no solo em relação à adubação mineral.

As adubações com biofósforo na dose de 100%, 115% e 150% proporcionaram maiores teores no solo na soma de bases (SB) e CTC efetiva (t) (Figura 4A e 4B). Para essas variáveis, somente o tratamento AM + B apresentou redução do valor em comparação ao valor inicial do experimento. A soma de bases representa a soma dos cátions trocáveis no solo ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Na}^{2+}$ ), enquanto a CTC efetiva é a soma das bases acrescido do Al. O CTC a pH 7,0 (CTC) é o valor da soma de bases somado ao teor de H + Al, e se mostrou superior nas doses de 100% e 150% de biofósforo. Entretanto, somente o tratamento com 150% biofósforo foi superior à condição inicial do solo ( $6,93 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Segundo MOREIRA et al., (2020), a aplicação de biofósforo aumentou capacidade de troca catiônica e a saturação por bases do solo, sendo que os tratamentos com maiores taxas de aplicação do resíduo apresentaram maiores médias em relação ao tratamento com fertilizante mineral. Eles ainda afirmam que, por o resíduo ser tratado com  $\text{CaO}$ , isso contribui com a saturação por bases e dos teores de Ca.

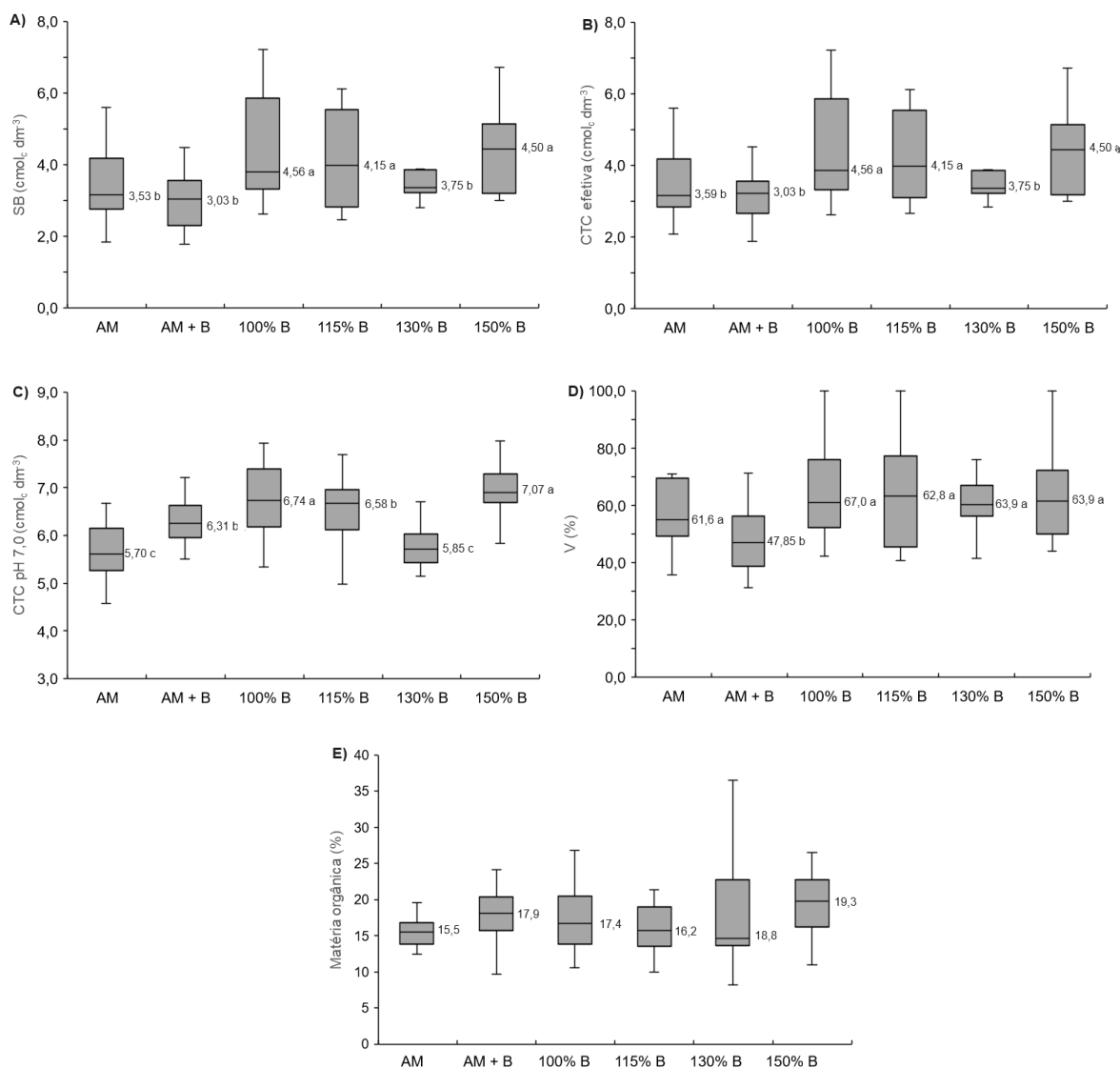


Figura 4 - Soma de bases (SB), CTC efetiva, CTC pH 7,0, índice de saturação por bases (%) e teor de matéria orgânica do solo para diferentes tipos de adubação..

AM: adubação mineral, AM + B: adubação mineral + biofertilizante, B: biofertilizante.

Letras iguais minúsculas em cada gráfico representam médias iguais para o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Em relação ao índice de saturação de bases (Figura 4D), este foi menor no tratamento com adubação mineral associado ao biofertilizante, enquanto os demais apresentaram médias acima de 60%. Entretanto, todos se apresentaram superior ao início do experimento, quando o V era de 47,59%. Considerando que a SB e a V% são diretamente relacionadas à presença das bases no solo, observa-se que a maior adição de Ca, Mg e K no tratamento com lodo de esgoto calcado resultou em maiores

valores de SB e V%, nas duas profundidades avaliadas (Nascimento, Sampaio, Junio, et al., 2014).

O teor de matéria orgânica do solo não diferiu significativamente (5% de probabilidade) entre os tratamentos testados (Figura 4E), apesar da adubação mineral apresentar menor média. Breda et al., (2020) também observaram que a aplicação da menor dose de biossólido não resultou em diferença significativa nas propriedades do solo em comparação com o controle e com o tratamento químico. Entretanto, a maioria dos trabalhos encontram aumento do teor de matéria orgânica com a aplicação do biossólido, conforme encontrado por Li et al. (2024) Achkir et al. (2023), e Pegoraro et al. (2024).

Em relação ao tempo de coleta, é possível observar que o pH e a CTC potencial (pH 7,0) apresentaram redução dos seus valores com os meses (Figura 5A e 5G). Hamdi et al., (2019) observaram que, após três aplicações anuais sucessivas de lodo, houve uma ligeira redução do pH do solo com o aumento da dose de biossólido aplicada. De acordo com Viçosi e Garcia, (2024), o lodo de esgoto caledado apresenta alta reatividade inicialmente no solo, com posterior redução da reação de alcalinização ao longo do tempo, o que confere ao resíduo a possibilidade de ser utilizado na agricultura como corretivo agrícola. Entretanto, a posterior acidificação do solo é resultado da matéria orgânica em decomposição, que produz  $H^+$  e  $CO_2$ , formando ácidos orgânicos fracos, resultando em uma diminuição gradual do pH (Hamdi et al., 2019). Além disso, os mesmos autores atribuem que a variação do pH em solos modificados depende de vários fatores, incluindo a qualidade do lodo, a dose, bem como as características do solo e as condições de mineralização.

Os teores de cálcio, soma de bases, CTC efetiva e saturação por bases (V) têm comportamento quadrático (Figura 5C, 5E, 5G e 5H), com o valor máximo próximo aos nove meses após o plantio, enquanto o  $H + Al$  teve seu ponto de mínimo nesse período (Figura 5D). O fósforo, entretanto, não teve equação significativa (Figura 5B). Pegoraro et al., (2024) observaram regressões quadráticas para o aumento dos teores de P, Ca, Mg e SB no solo tratado com lodo, o que afirmam indicar que a atividade biológica do solo proporcionou maiores taxas de mineralização de nutrientes no 30 a 90 dias.

O fósforo liberado pelo biossólido ocorre de forma gradual na solução do solo, sendo que a maior parte está em formas indisponíveis ou imobilizado por meio de sorção físico-química e interação com microrganismos (da Silva et al., 2021; Silva et

al., 2024). Entretanto, ao longo do tempo de incubação, a disponibilidade de P diminuiu ao longo do tempo, indicando uma forte interação do fósforo disponibilizado com os argilominerais do solo (Pegoraro et al., 2024).

O fósforo liberado pelo biossólido ocorre de forma gradual na solução do solo, sendo que a maior parte está em formas indisponíveis ou imobilizado por meio de sorção físico-química e interação com microrganismos (da Silva et al., 2021; Silva et al., 2024). Entretanto, ao longo do tempo de incubação, a disponibilidade de P diminuiu ao longo do tempo, indicando uma forte interação do fósforo disponibilizado com os argilominerais do solo (Pegoraro et al., 2024).

O teor de MO atingiu seu máximo (20,6%) aos 11,7 meses, conforme Figura 5I. A matéria orgânica dos biossólidos é constituída, predominantemente, por compostos recalcitrantes e, após aplicação no solo, a taxa de degradação é dependente da intensidade dos processos biológicos. (Andrade et al., 2006). Silva, da et al., (2022) observaram que as maiores taxas de mineralização da matéria orgânica ocorreram nos primeiros 20 dias de incubação das amostras, período em que 20 a 35% do carbono orgânico quantificado foi degradado. O processo de degradação ocorre em duas etapas: a primeira, intensa e de curta duração (média de 8 dias), em que compostos mais lábeis de carbono são exauridos; e a segunda etapa, menos intensa e responsável por mais de 65% do total de carbono orgânico degradado durante o período de 70 dias de avaliação (Andrade et al., 2006). Além disso, a baixa relação C/N também pode promover a rápida mineralização da matéria orgânica no lodo de esgoto (Balík et al., 2022).

Os parâmetros de solo que apresentaram interação entre a fonte de adubação e o tempo de coleta está na Tabela 4. A coleta realizada aos nove meses após o plantio apresentou maior teor de sódio no solo, em especial quando associado ao tratamento com 100% e 150% de biossólido. Além disso, o tratamento com 130% de biossólido na coleta aos 21 meses apresentou maiores teores, enquanto os menores teores estão na coleta aos 3 e 15 meses, período mais próximo da aplicação da adubação e logo depois ao período chuvoso. De acordo Jesus e Borges (2020), períodos de menor pluviosidade não permite uma lixiviação adequada do sal no solo, levando a maior acumulação. Isso pode ter ocorrido pois a coleta aos nove meses foi realizada em período seco, e além disso, como o sistema de gotejamento forma um bulbo molhado, que promove a lixiviação dos sais somente dentro do local irrigado.

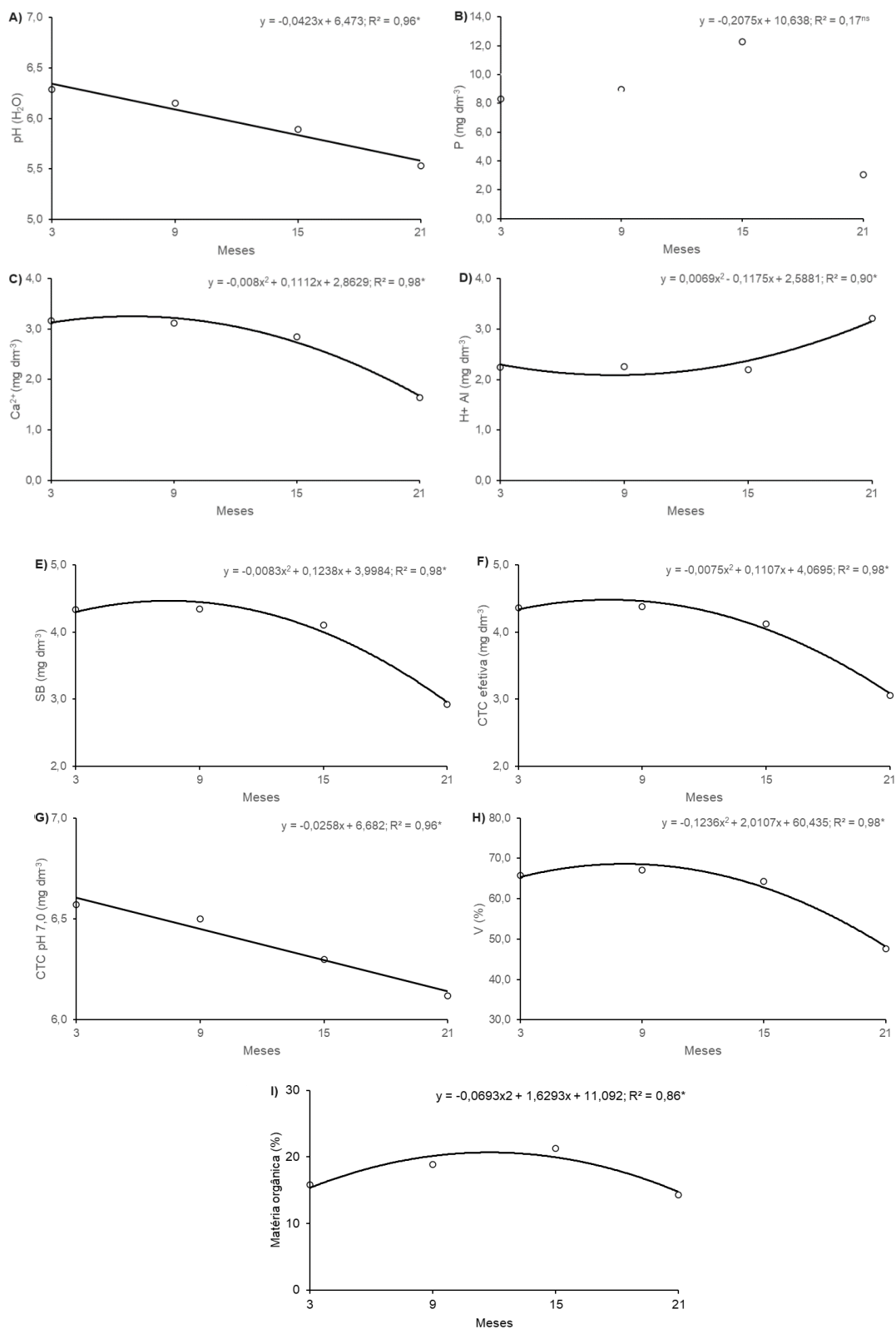


Figura 5 - Regressão para os atributos químicos do solo de acordo com o tempo de coleta após o plantio.

SB: soma de bases, V: índice de saturação por bases.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

Em relação ao potássio, o tratamento com 115% da dose de biossólido se mostrou estatisticamente inferior nas coletas aos 3, 9 e 21 meses, enquanto o tratamento 2 apresentou menores valores nas coletas aos 15 e 21 meses. Os tratamentos 0, 2, 4 e 5 continuaram com médias estatisticamente iguais ao longo das coletas. Isso segue a tendência observada pelo Rodrigues et al., (2024), que observou diferença de K entre os tratamentos, mas com pouca coerência quanto à natureza dos tratamentos incluídos no estudo. Apesar disso, todos os tratamentos apresentaram teor de K inferior ao obtido antes do experimento ( $232 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Segundo Amorim Júnior et al., (2021), o potássio é o nutriente que não está em quantidade adequada no biossólido para atender parcial ou totalmente as necessidades das culturas agrícolas. Por ser altamente solúvel, e o esgoto que chega para tratamento é composto por 99,9% de água, grande parte do K e Na ficam solubilizados na água residuária (Abreu et al., 2019).

Para os teores de magnésio, valores acima de  $1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  estão presentes na coleta aos 15 meses, nos tratamentos 100% B e 150% da dose recomendada de biossólido. Breda et al. (2020) notaram diferenças na concentração de Mg apenas na primeira e segunda aplicações de lodo. Para Rodrigues et al., (2024), os teores de S, K e Mg foram minimamente influenciados pelas características e quantidades do lodo de esgoto, com poucas diferenças significativas com a fertilização mineral.

Os maiores valores de alumínio no solo estão nos tratamentos 1 e 3, e na coleta realizada aos 21 meses, assim como os valores de saturação por alumínio (m). O teor de alumínio indica o teor do elemento na forma iônica  $\text{Al}^{3+}$  (também denominada acidez trocável), forma tóxica às plantas. Com a elevação do pH, o Al se liga ao  $\text{OH}^-$  no solo, dando origem ao precipitado inerte  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Prezotti & Martins, 2013).

Os teores dos micronutrientes presentes no solo estão na Figura 6. Para o teor de Fe no solo, valores mais altos foram encontrados nos tratamentos com adubação mineral e adubação mineral com biossólido, enquanto as menores médias estão nos tratamentos com biossólido. Teores mais baixos de Cu foram encontrados no tratamento com 130% de biossólido. Os valores de zinco foram iguais em todos os tratamentos, porém sofreu grande variação dentro deles. De acordo com Feng et al. (2023), o Zn é distribuído em frações trocáveis, redutíveis, oxidáveis e residuais de lodo de esgoto e, portanto, são relativamente móveis, enquanto o Cu é distribuído predominantemente na fração oxidável.

Tabela 4 - Valores de sódio, potássio magnésio, alumínio e saturação por alumínio (m) em solo cultivado com laranja e diferentes fontes de adubação ao longo do tempo.

<b>Na (mg dm<sup>-3</sup>)</b>				
	<b>3 meses</b>	<b>9 meses</b>	<b>15 meses</b>	<b>21 meses</b>
<b>AM</b>	8,07 Ba	21,55 Ab	2,40 Ba	8,00 Bb
<b>AM + B</b>	2,17 Ba	14,37 Ac	0,47 Ba	4,52 Bb
<b>100 B</b>	5,10 Ba	33,17 Aa	6,60 Ba	11,16 Bb
<b>115 B</b>	3,90 Ba	19,12 Ab	2,42 Ba	6,63 Bb
<b>130 B</b>	1,90 Ba	23,12 Ab	2,42 Ba	19,43 Aa
<b>150 B</b>	4,47 Ca	29,65 Aa	4,30 Ca	13,22 Ba
<b>K (mg dm<sup>-3</sup>)</b>				
<b>AM</b>	185,60 Aa	112,35 Aa	125,47 Ab	146,90 Aa
<b>AM + B</b>	149,20 Aa	155,37 Aa	84,50 Bb	82,12 Bb
<b>100 B</b>	119,30 Aa	146,97 Aa	100,45 Ab	169,06 Ab
<b>115 B</b>	115,95 Ba	98,65 Ba	181,82 Aa	67,00 Ba
<b>130 B</b>	109,65 Aa	112,57 Aa	117,92 Ab	169,96 Aa
<b>150 B</b>	140,45 Aa	108,87 Aa	102,40 Ab	165,20 Aa
<b>Mg (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>				
<b>AM</b>	0,74 Aa	0,57 Ab	0,58 Ac	0,80 Aa
<b>AM + B</b>	0,79 Aa	0,78 Aa	0,90 Ab	0,74 Aa
<b>100 B</b>	0,85 Ba	0,86 Ba	1,21 Aa	0,90 Ba
<b>115 B</b>	0,80 Aa	0,84 Aa	0,84 Ab	0,85 Aa
<b>130 B</b>	0,81 Aa	0,84 Aa	0,89 Ab	0,88 Aa
<b>150 B</b>	0,75 Ba	0,99 Ba	1,20 Aa	0,90 Ba
<b>Al (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>)</b>				
<b>AM</b>	0,00 Aa	0,05 Ab	0,07 Aa	0,10 Ac
<b>AM + B</b>	0,06 Ca	0,13 Ba	0,00 Ca	0,48 Aa
<b>100 B</b>	0,06 Aa	0,00 Ab	0,03 Aa	0,00 Ac
<b>115 B</b>	0,05 Ba	0,02 Bb	0,03 Ba	0,27 Ab
<b>130 B</b>	0,00 Aa	0,00 Ab	0,00 Aa	0,00 Ac
<b>150 B</b>	0,00 Aa	0,00 Ab	0,00 Aa	0,00 Ac
<b>m (%)</b>				
<b>AM</b>	0,00 Aa	2,40 Aa	2,59 Aa	4,65 Ac
<b>AM + B</b>	2,42 Ba	4,99 Ba	0,00 Ba	17,80 Aa
<b>100 B</b>	2,02 Aa	0,00 Aa	0,98 Aa	0,00 Ad
<b>115 B</b>	1,87 Ba	0,79 Ba	1,29 Ba	8,97 Ab
<b>130 B</b>	0,00 Aa	0,00 Aa	0,00 Aa	0,00 Ad
<b>150 B</b>	0,00 Aa	0,00 Aa	0,00 Aa	0,00 Ad

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Em relação ao manganês, o teor mais alto foi encontrado com 150% de biossólido, intermediários onde tem adubação mineral, e mais baixos com 100%, 115% e 130% de biossólido. O teor de boro não foi significativo. Freiburger et al., (2020) observaram que a concentração de B no solo não foi alterada com a adição de biossólido e atribuem isso à elevação do pH, que promoveu um efeito de adsorção do elemento, o que levou à ausência de alteração em sua concentração no solo.

De acordo com Hamdi et al. (2019), a adição de lodo de esgoto causou um aumento substancial no teor de metais pesados (Pb, Ni, Zn e Cu) de maneira dose-dependente. AL-Huqail et al. (2023) afirmam que, apesar do aumento dos teores de Cd, Cr, Cu, Fe, Zn, Pb e Ni no solo, todos estavam dentro dos limites seguros de qualidade do solo para cultivos agrícolas.

A aplicação ao solo leva a um baixo aumento de metais pesados disponíveis no solo, semelhante ao observado com o fertilizante mineral, porque esses elementos também estavam presentes em baixos níveis no lodo (Nascimento et al., 2023). O mesmo foi observado por Cu e Zn, uma vez que a quantidade de metais adicionados com uma aplicação agrícola típica de biossólido é relativamente pequena em comparação com os valores de fundo no solo agrícola (Feng et al., 2023). O teor de matéria orgânica é outro fator importante que controla a biodisponibilidade de metais pesados, sendo reconhecida como um importante agente adsorativo meio para traços de metais no solo (Hamdi et al., 2019). A maioria dos metais estão ligada na forma de fração indisponível e, em alguns casos, estava ligada à fração de matéria orgânica (Wydro et al., 2021).

Em relação ao tempo (Figura 7), somente os elementos zinco e boro apresentaram regressão significativa. O Zn teve tendência de reduzir seu teor com o tempo, porém, a regressão apresentou baixo ajustamento dos dados ( $R^2 = 0,27$ ). Em relação ao boro, o comportamento foi positivo, com aumento do teor do micronutriente com o tempo.

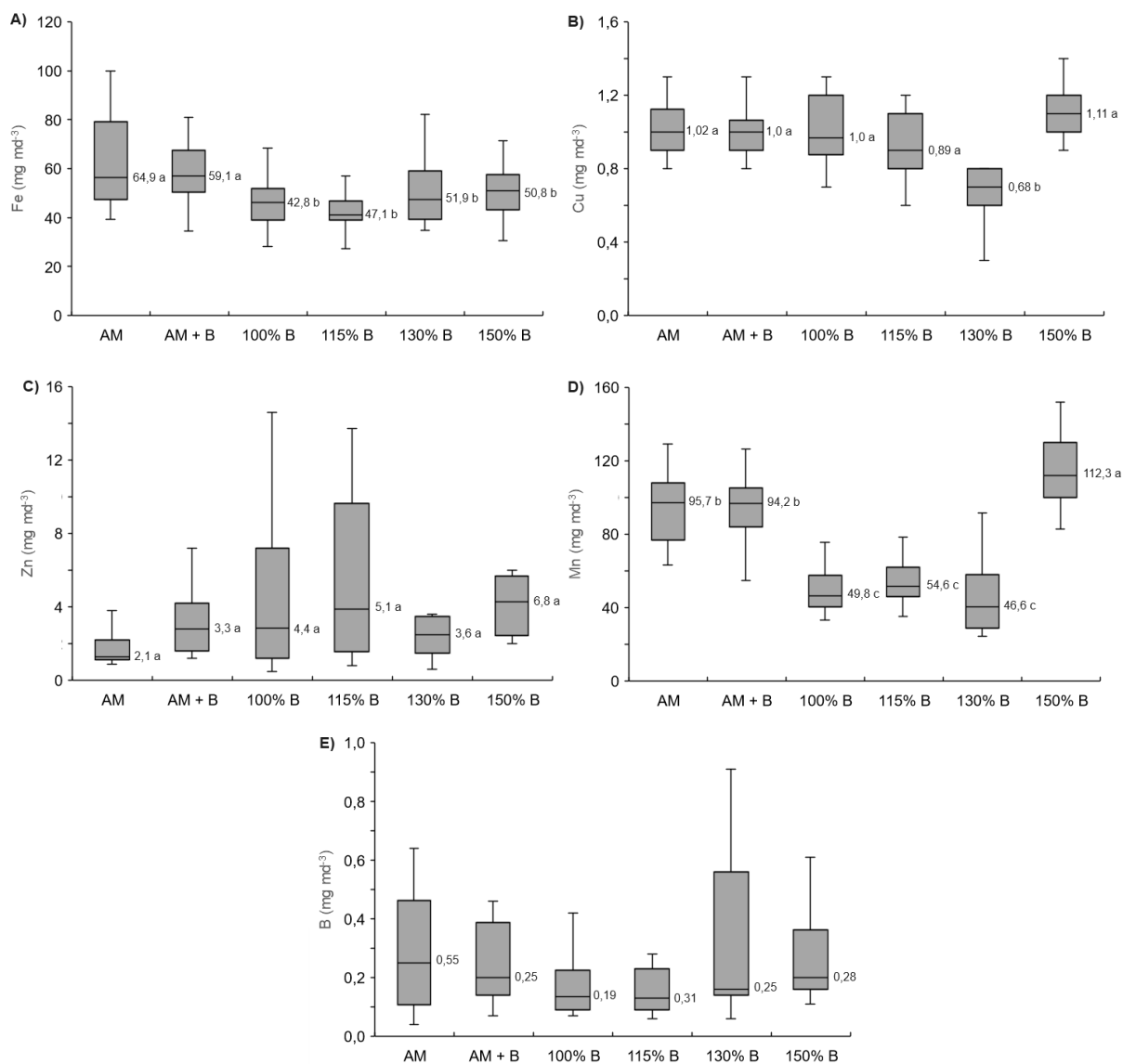


Figura 6 - Teores de micronutrientes no solo cultivado com laranja e adubado com biossólido.

AM: adubação mineral, AM + B: adubação mineral + biossólido, B: biossólido.

Letras iguais minúsculas em cada gráfico representam médias iguais para o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

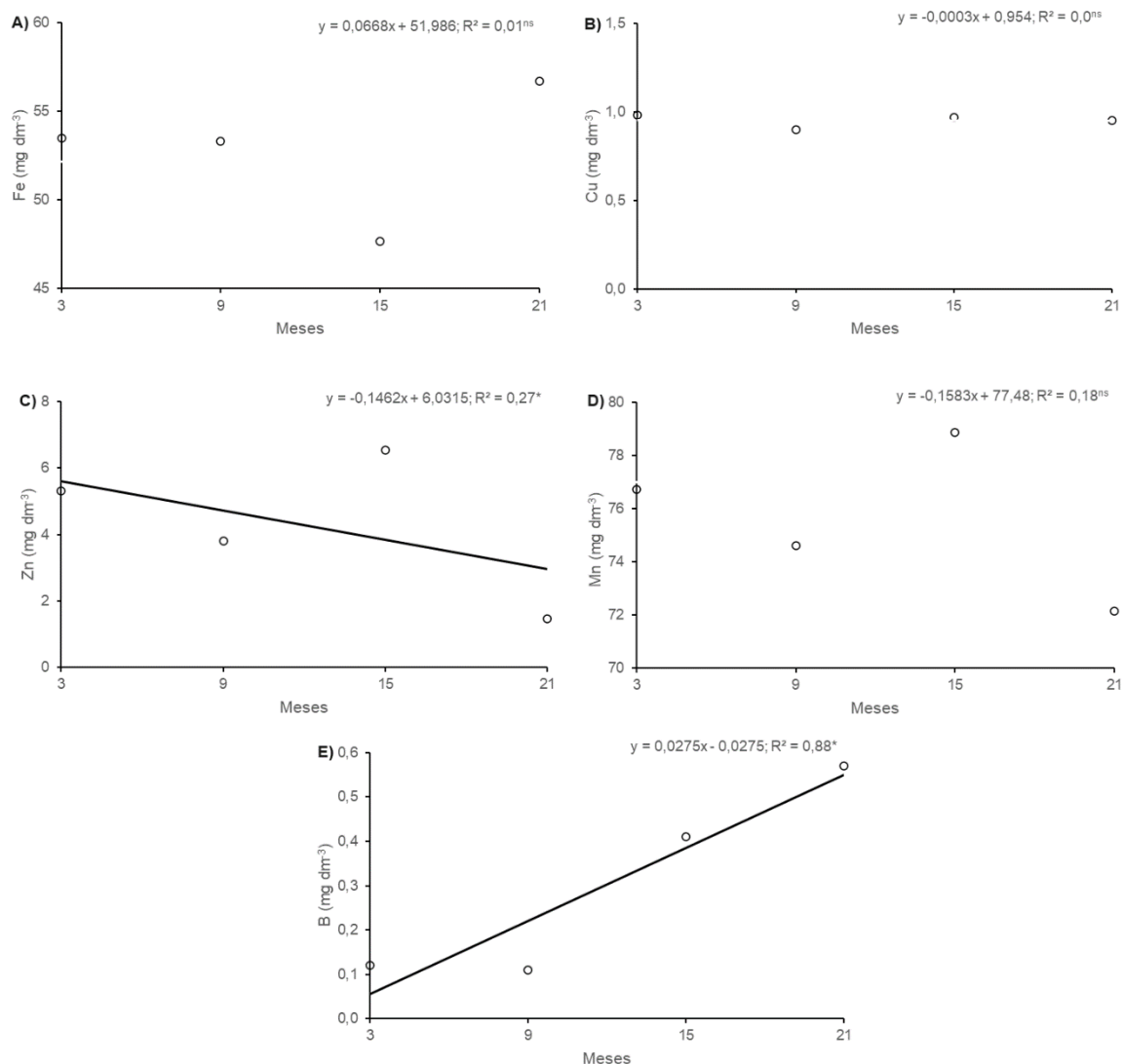


Figura 7 - Teores de micronutrientes no solo cultivado com laranjeira e adubado com biossólido ao longo do tempo.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

A redução do teor de Zn pode ser devido às maiores perdas do elemento devido à lixiviação e absorção pelas plantas, bem como às mudanças para formas indisponíveis (Nascimento et al., 2023). A fitodisponibilidade de nutrientes no solo depende da presença de constituintes orgânicos e inorgânicos, propriedades do solo, atividade biológica, dentre outros fatores. Além disso, devido ao poder tamponante dos solos ricos em oxi-hidróxi de Fe e Al e matéria orgânica, pode ocorrer a formação de quelatos e reduzir a disponibilidade (Yada et al., 2020). De acordo com Florentino et al. (2019), um clima tropical de intemperismo, com altas médias de precipitação e temperaturas, promove fenômenos de lixiviação que evitam processos de acumulação de elementos tóxicos ao longo do tempo.

A aplicação do bio sólido em solos também pode afetar a microbiologia do solo. A adição de lodo de esgoto pode aumentar as atividades microbianas, sua população e a produção de biomassa (Kominko et al., 2017). Além disso, também aumenta a atividade enzimática e taxa de reação enzimas do solo na qual durante sua decomposição (Hamdi et al., 2019). Dentre as diversas enzimas presente no solo, as fosfatases ácidas e alcalinas e desidrogenases responderam positivamente à aplicação do resíduo, e que mesmo a aplicação de altas doses repetidamente não limitam a atividade bioquímica geral do solo (Siebielec et al., 2018).

Apesar do nosso trabalho não mostrar aumento além dos limites permitidos de metais no solo através da adubação com bio sólido em 21 meses de estudo, é essencial fazer o monitoramento dos elementos a longo prazo. Implementar práticas rigorosas de monitorização e regulamentação, além de testes regulares de metais pesados e outros contaminantes do solo, pode ajudar a mitigar os riscos associados ao uso de lodo (Hernández et al., 2024)

Quando a aplicação de bio sólidos no solo respeita os aspectos legais de viabilidade, pode ser continuada sem impacto negativo no ecossistema ao longo de vários anos (Amorim Júnior et al., 2021). Assim, recomenda-se uma boa gestão da aplicação de lodo de esgoto para garantir a sustentabilidade e os benefícios, ao mesmo tempo que se controla os riscos de contaminação dos solos (Achkir et al., 2023). Desse modo, o bio sólido o pode ser usado em vez de fertilizante químico para reduzir a carga de descarte do lodo e manter a qualidade do meio ambiente (Nahar & Shahadat Hossen, 2021).

#### **4. CONCLUSÃO**

Bio sólidos nas doses de 100%, 115% e 150% aumentaram significativamente os teores de fósforo, cálcio e a soma de bases no solo. Isso demonstra que a aplicação de bio sólido pode melhorar a fertilidade do solo em comparação com adubação exclusivamente mineral.

A adubação com bio sólido não proporcionou aumento nas quantidades de micronutrientes e metais pesados no solo (como Cu e Zn), que permaneceram dentro dos limites seguros para uso agrícola.

Desse modo, o uso de bio sólido pode ser uma alternativa viável e sustentável à adubação mineral, desde que se respeitem as normas legais e se faça um monitoramento constante para evitar a contaminação do solo. A boa gestão da aplicação de lodo de esgoto é crucial para garantir a sustentabilidade e maximizar os benefícios dessa prática agrícola.

## 5. REFERÊNCIA

- ABREU, A. H. M. DE; ALONSO, J. M.; MELO, L. A. DE; LELES, P. S. DOS S.; SANTOS, G. R. DOS. Caracterização de bio sólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, 2019.
- ACHKIR, A.; AOURAGH, A.; MAHI, M. EL; LOTFI, E. M.; LABJAR, N.; BOUCH, M. EL; OUAHIDI, M. L.; BADZA, T.; FARHANE, H.; MOUSSAOUI, T. EL. Implication of sewage sludge increased application rates on soil fertility and heavy metals contamination risk. **Emerging Contaminants**, v. 9, n. 1, 1 mar. 2023.
- AMORIM JÚNIOR, S. S. DE; PEREIRA, M. A. DE S.; LIMA, P. DE M.; MARISHIGUE, M.; GUILHERME, D. DE O.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C. Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100245, 2021.
- AMORIM JUNIOR, S. S.; HWA MAZUCATO, V. S.; MACHADO, B. DOS S.; OLIVEIRA GUILHERME, D. DE; BRITO DA COSTA, R.; CORREA MAGALHÃES FILHO, F. J. Agronomic potential of biosolids for a sustainable sanitation management in Brazil: Nutrient recycling, pathogens and micropollutants. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, 2021.
- ANDRADE, C. A. DE; OLIVEIRA, C. DE; CERRI, C. C. Cinética de degradação da matéria orgânica de bio sólidos após aplicação no solo e relação com a composição química inicial. **Bragantia**, v. 65, 2006.
- BALÍK, J.; KULHÁNEK, M.; ČERNÝ, J.; SEDLÁŘ, O.; SURAN, P.; PROCHÁZKOVÁ, S.; ASRADE, D. A. The impact of the long-term application of mineral nitrogen and sewage sludge fertilizers on the quality of soil organic matter. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 9, n. 1, p. 86, 2022.
- BOARETTO, R. M.; MATTOS JUNIOR, D.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E. Acúmulo de nutrientes e destino do nitrogênio (15N) aplicado em pomar jovem de laranja. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, 2007.
- BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 388–393, 2015.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília: MAPA, 2017.

BREDA, C. C.; SOARES, M. B.; TAVANTI, R. F. R.; VIANA, D. G.; FREDDI, O. DA S.; PIEDADE, A. R.; MAHL, D.; TRABALLI, R. C.; GUERRINI, I. A. Successive sewage sludge fertilization: Recycling for sustainable agriculture. **Waste Management**, v. 109, p. 38–50, 15 maio 2020.

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

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- Mandioca e Fruticultura. Disponível em: <[https://www.cnpmf.embrapa.br/Base\\_de\\_Dados/index\\_pdf/dados/brasil/laranja/b1\\_laranja.pdf](https://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/laranja/b1_laranja.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2024.

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**, v. 22, n. 4, p. 1037–1058, 2023.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **R Core Team** \_ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs, 2021.

FLORENTINO, A. L.; FERRAZ, A. DE V.; GONÇALVES, J. L. DE M.; ASENSIO, V.; MURAOKA, T.; SANTOS DIAS, C. T. DOS; NOGUEIRA, T. A. R.; CAPRA, G. F.; ABREU-JUNIOR, C. H. Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 177–187, 2019.

FREIBERGER, M. B.; CASTOLDI, G.; CAPUANI, S.; RIBEIRO, D. O.; SILVA, F. G.; BÜLL, L. T. Long-term sewage sludge application in a tropical Oxisol: Effects on acidity and availability of micronutrientes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 402–408, 2020.

HAMDI, H.; HECHMI, S.; KHELIL, M. N.; ZOGHLAMI, I. R.; BENZARTI, S.; MOKNITLILI, S.; HASSEN, A.; JEDIDI, N. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. **CATENA**, v. 172, p. 11–20, 2019.

HERNÁNDEZ, T.; LÓPEZ ARAGÓN, R. F.; GARCIA, C. The Use of Aerobic Urban Sewage Sludge in Agriculture: Potential Benefits and Contaminating Effects in Semi-Arid Zones. **Agriculture**, v. 14, n. 7, 2024.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Estação: ALEGRE A617. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001>>. Acesso em: 30 jun. 2024.

JESUS, J.; BORGES, M. T. Salinização de solos em Portugal. **Revista de Ciência Elementar**, v. 8, n. 3, 2020.

KOMINKO, H.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. The Possibility of Organo-Mineral Fertilizer Production from Sewage Sludge. **Waste and Biomass Valorization**, v.8, n. 5, p. 1781-1791, 2017.

- KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. DE. Physical and chemical properties of renewable substrates. **Revista Árvore**, v. 37, p. 1103–1113, 2013.
- LI, L.; LI, H.; TONG, L.; LV, Y. Sustainable Agriculture Practices: Utilizing Composted Sludge Fertilizer for Improved Crop Yield and Soil Health. **Agronomy**, v. 14, n. 4, 2024.
- LIMA, J. S. DE S.; SILVA, S. DE A.; OLIVEIRA, R. B. DE; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C. Variabilidade temporal da precipitação mensal em Alegre-ES. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 2, p. 327–332, 2008.
- MOREIRA, R. S.; LENSE, G. H. E.; FÁVERO, L. F.; OLIVEIRA JUNIOR, B. M. DE; MINCATO, R. L. Nutritional status and physiological parameters of maize cultivated with sewage sludge. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, 2020.
- NAHAR, N.; SHAHADAT HOSSEN, M. Influence of sewage sludge application on soil properties, carrot growth and heavy metal uptake. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 1, p. 1–10, 2021.
- NASCIMENTO, A. L.; DURÃES, M. C. O.; SAMPAIO, R. A.; ZUBA JUNIOR, G. R.; PRATES, F. B. DE S.; FERNANDES, L. A.; ZONTA, E.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. DO. Heavy metals in the soil and castor bean plants fertilized with sewage sludge stabilized by different processes. **Ciência Rural**, v. 53, 2023.
- NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; JUNIO, G. R. Z.; FERNANDES, L. A.; CRUZ, S. F. DA; CARNEIRO, J. P.; BARBOSA, C. F.; LIMA, N. N. DE. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, 2014.
- PEGORARO, R. F.; SILVA, J. R. T.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A.; BICALHO, S. F.; SOARES, V. A. S. F. Nutrient availability in tropical soils fertilized with sewage sludge and natural phosphate. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture (IJROWA)**, v. 13, n. 2, p. 1–15, 2024.
- PREZOTTI, L. C.; MARTINS, A. G. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória: Incaper, 2013.
- PREZOTTI, L. C.; OLIVEIRA, J. A.; DADALTO, G. G.; GOMES, J. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 5a aproximação**. Vitória: SEEA; Incaper; CEDAGRO, 2007.
- RODRIGUES, M. Â.; SAWIMBO, A.; SILVA, J. M. DA; CORREIA, C. M.; ARROBAS, M. Sewage Sludge Increased Lettuce Yields by Releasing Valuable Nutrients While Keeping Heavy Metals in Soil and Plants at Levels Well below International Legislative Limits. **Horticulturae**, v. 10, n. 7, 2024.
- SETIN, D. W.; CARVALHO, S. A. DE; MATTOS JÚNIOR, D. DE. Crescimento inicial e estado nutricional da laranjeira “Valência” sobre porta-enxertos múltiplos de limoeiro “Cravo” e citrumeleiro “Swingle”. **Bragantia**, v. 68, 2009.
- 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**, v.187, p. 372-379, 2018.

- SILVA, D. A. P. DA; MATOS, M. P.; MARQUES, M. V. A.; MATOS, A. T. DE; ALENCAR NEVES, T. DE. Kinetics and mineralization fraction of organic matter from sewage sludge mixed with soil under controlled laboratory conditions. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 22426, 2022.
- SILVA, G. H. M. C.; SILVA, W. R.; XIMENES, D. H. DE S. V.; VIEIRA, C. B.; SOUZA, E. R. DE; NASCIMENTO, C. W. A. DO; ALMEIDA JUNIOR, A. B. DE; BIONDI, C. M. Assessing the effects of biochar, sewage sludge, and mineral fertilization on soil characteristics and maize yield. **Bragantia**, v. 83, 2024.
- SILVA, W. R. DA; NASCIMENTO, C. W. A. DO; SILVA, F. B. V. DA; SOUZA, A. A. B. DE; FRACETTO, G. G. M.; SÁ VELOSO XIMENES, D. H. DE. 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**, v. 21, n. 2, p. 1076–1088, 2021.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.
- VELOSO, C. A. C.; BOTELHO, S. M.; RODRIGUES, J.; SILVA, A. R. **Correção da acidez do solo**. Em: BRASIL, EC; CRAVO, MS; VIÉGAS, I. de JM. Brasília: Embrapa, 2020. p. 121–131.
- VIÇOSI, K. A.; GARCIA, G. DE O. Efeito do lodo de esgoto caledo e não caledo no pH de solos de diferentes texturas. **Scientia Plena**, v. 20, n. 4, 2024.
- WYDRO, U.; JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, A.; HAWRYLIK, E.; BUTAREWICZ, A.; RODZIEWICZ, J.; JANCZUKOWICZ, W.; WOŁEJKO, E. Heavy metals behavior in soil/plant system after sewage sludge application. **Energies**, v. 14, n. 6, 2021.
- YADA, M. M.; MELO, W. J. DE; MELO, V. P. DE. Elementos-traço no solo, na planta e no grão de plantas de milho cultivadas em latossolos tratados com lodo de esgoto por 16 anos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, 2020.

## **CONCLUSÃO GERAL**

O uso de biossólido na agricultura apresenta um grande potencial para promover a sustentabilidade, reciclando nutrientes e matéria orgânica de maneira eficiente. Esse recurso pode melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade das culturas e reduzir a dependência de fertilizantes químicos, contribuindo para a economia circular. Entretanto, deve-se promover um tratamento adequado de higienização e estabilização do lodo de esgoto, dentre eles a caleação, e realizar uma análise química prévia para prever potenciais elementos contaminantes.

Na laranjeira, se mostrou como uma fonte de nutrientes tanto na fase de produção de mudas, fazendo parte da composição do substrato, tanto na fase de campo, como fertilizante orgânico no plantio e no período inicial de cultivo. Quando a utilização do biossólido corre realizado das normas ambientes vigentes, reduz-se os riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Assim, o uso consciente e bem planejado do biossólido pode ser uma solução eficaz para a gestão de resíduos e a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis.