

Potencial de uso agrícola de biossólido oriundo de estação de tratamento de esgoto, Petrolina (PE)

Potential agricultural use of biosolids from a sewage treatment plant, Petrolina, (PE)

Janielle Souza Pereira¹, Miriam Cleide Cavalcante de Amorim², Nelci Olszewski³, Paula Tereza de Souza e Silva⁴, Marcella Vianna Cabral Paiva⁵, Vanessa Polon Donzeli⁶

RESUMO: O uso agrícola do biossólido é considerado uma alternativa à problemática ambiental ocasionada pelo lodo gerado no tratamento biológico do esgoto doméstico ou sanitário. Esse resíduo pode promover economia na aquisição de fertilizantes por ser um condicionador do solo e possuir nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal. Seguir a regulamentação vigente no país é condição determinante para viabilizar esse reaproveitamento. Assim, o trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do biossólido proveniente de reator anaeróbico de fluxo ascendente para reúso na agricultura, após estabilização e higienização com óxido de cálcio, comparando os resultados de sua caracterização com o preconizado pelos critérios de qualidade estabelecidos por normas brasileiras vigentes. O biossólido atendeu às exigências da Resolução número 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente para aplicação na agricultura. O resíduo não atendeu aos limites de tolerância para os elementos níquel, cobre, zinco, ferro e manganês estabelecidos pela Instrução Normativa nº 25 de 2009 do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. O biossólido pode ser utilizado para fins de condicionamento físico e fertilização do solo/substrato, contribuindo para minimização de impactos ambientais provenientes de um possível descarte inadequado.

Palavras-chave: Fertilizante orgânico. Lodo de esgoto. Reúso. Resíduo urbano.

ABSTRACT: The agricultural use of biosolids is an alternative to the environmental problems caused by the sludge generated in the biological treatment of domestic or sanitary sewage. This waste can promote savings in the acquisition of fertilizers because it is a soil conditioner and has essential nutrients for plant development. Following the regulations in force in the country is a determining condition to make this reuse feasible. Thus, the objective of this study was to evaluate the potential of biosolids from an ascending flow anaerobic reactor for use in agriculture, comparing the results of its characterization with the recommended quality criteria established by current Brazilian standards. The biosolid used was from upflow anaerobic reactors after drying and sanitization with lime. The biosolid meets the requirements of Resolution number 498/2020 of the National Council of the Environment for application in agriculture. The residue only does not meet the tolerance limits for the elements nickel, copper, zinc, iron and manganese established by Normative Instruction No. 25 of 2009 of the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. The biosolids can be used for physical conditioning and soil/substrate fertilization, contributing to minimize environmental impacts from a possible improper disposal.

Keywords: Organic fertilizer. Sewage sludge. Reuse. Urban waste.

¹ Mestre em Engenharia Agrícola, Doutoranda pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras (MG), Brasil.

² Doutora em Engenharia Química. Docente efetiva do colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro (BA), Brasil.

³ Doutora em Solos e Nutrição de Plantas. Docente efetiva do colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro (BA), Brasil.

⁴ Doutora em Química, Pesquisadora da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Semiárido, Petrolina (PE), Brasil

⁵ Doutora em Tecnologia Ambiental e Recursos hídricos, Coordenadora Técnica de Esgoto na Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), Petrolina (PE), Brasil

⁶ Doutora em Genética e Biologia Molecular. Docente efetiva do colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro (BA), Brasil

Autor correspondente: Janielle Souza Pereira
E-mail: janielle.engenheira@gmail.com

Recebido em: 25/04/2023
Aceito em: 09/08/2023

INTRODUÇÃO

O lodo gerado pelos tratamentos biológicos do esgoto doméstico ou sanitário é um resíduo que pode provocar problemas ambientais e financeiros para as estações de tratamento, em função de sua quantidade e do custo operacional para seu processamento e disposição final, representando cerca de 60% das despesas financeiras (Moreira *et al.*, 2019; Pereira; Garcia, 2017). Portanto, seu reaproveitamento deve ser considerado como opção de destino, seja para recuperação de áreas degradadas, reúso industrial ou reaproveitamento como resíduo orgânico para a agricultura e, não apenas para incineração ou disposição em aterro sanitário (Almeida *et al.*, 2023; Oliveira; Kikkawa; Santos, 2018), podendo gerar receitas e minimizar impactos ambientais.

Para fins de uso agrícola, como fonte de adubação orgânica, o lodo deve ser submetido a tratamento para aquisição de características adequadas e, a partir deste ponto, o subproduto passa a ser denominado de biossólido (Araújo *et al.*, 2022; Freddi, 2019). Assim, se torna indispensável a qualificação desse resíduo, antes da sua disposição ou reúso (Gomes *et al.*, 2021), com a realização de tratamentos para estabilização, através de processos de digestão aeróbia e anaeróbia, compostagem, estabilização química e térmica, condicionamento e higienização, enquadrando-o segundo a regulamentação vigente em cada país (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014; Araújo *et al.*, 2022).

No Brasil, a Resolução nº 498 de 19 de agosto de 2020, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) normatiza a aplicação de biossólido em solos, limitando os teores de substâncias inorgânicas e de agentes patogênicos permitidos neste material residual. Essa norma, também, proíbe seu uso no solo, quando este não se enquadrar na Classe A ou B. A Instrução Normativa nº 25 de 23 de julho de 2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por sua vez, estabelece os níveis de tolerância para uso como fertilizantes orgânicos destinados à agricultura. Tais medidas buscam a garantia da qualidade dos corpos hídricos e do solo, além da segurança alimentar (Brasil, 2020; Brasil, 2009).

Dentre os reúsos do biossólido está o aproveitamento como fertilizante agrícola para a agricultura sustentável, devido à elevada carga orgânica e à presença de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal (fósforo, nitrogênio, enxofre, magnésio e cálcio), possibilitando a

ciclagem de nutrientes e o condicionamento físico ao ser aplicado ao solo, melhorando a retenção de água, a aeração, a infiltração e a agregação das partículas (Afáz *et al.*, 2017; Freddi, 2019).

Neste contexto, o trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do biossólido proveniente de reator anaeróbio de fluxo ascendente para reúso na agricultura, após estabilização e higienização com óxido de cálcio, comparando os resultados de sua caracterização com o preconizado pelos critérios de qualidade estabelecidos por normas brasileiras vigentes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O biossólido utilizado no ensaio foi proveniente do descarte do lodo de reatores RAFA (reator anaeróbio de fluxo ascendente) da estação de tratamento de esgoto (ETE Centro) da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), em Petrolina (PE), que trata esgotos sanitários, com etapas seguindo fluxograma exposto na Figura 1. As amostras foram coletadas do pátio de secagem, após o lodo passar por desidratação em decanter centrífugo, higienização com óxido de cálcio e exposição ao sol para secagem por 90 dias.

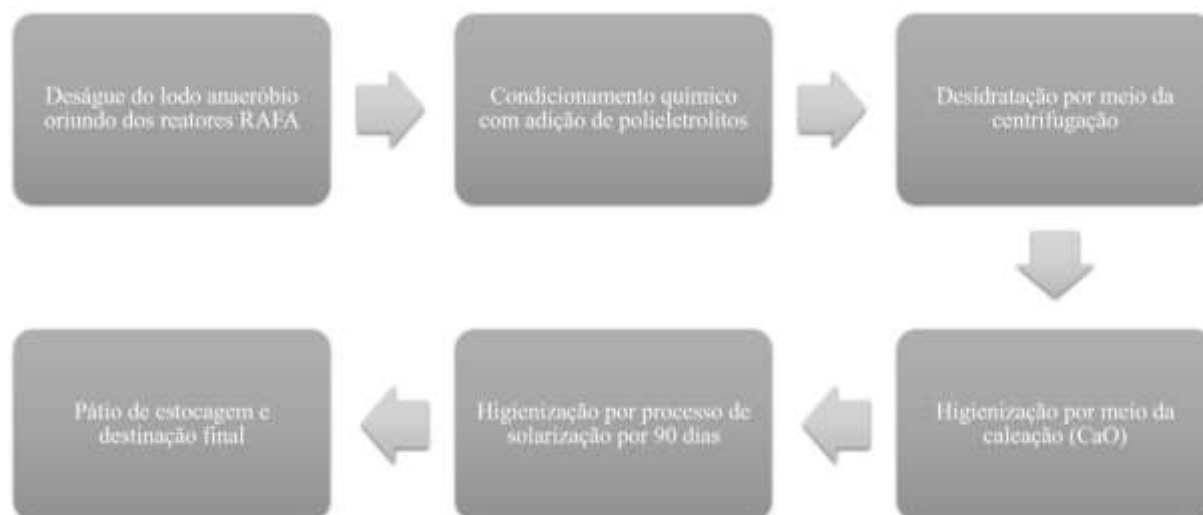


Figura 1. Fluxograma das etapas de tratamento do lodo anaeróbio.
Fonte: Autor (2023).

Considerando que o material amostrado se encontrava disposto em pilhas, a coleta das amostras seguiu o Método do Quarteamento (ABNT, 2004) se dividindo a pilha em quatro partes iguais, nas quais foram coletadas 15 subamostras com quantidades similares do material. Tais subamostras foram homogeneizadas para formar uma única amostra, acondicionadas em

recipientes esterilizados e encaminhadas ao laboratório para caracterização física, química e microbiológica, totalizando aproximadamente 50 kg de material.

Seguindo metodologias propostas pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012) e métodos da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2004), foram determinadas, no laboratório de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em triplicata: umidade a 65° C; sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (SV) e sólidos totais fixos (SF) pelo método gravimétrico, com posterior determinação de relação SV/ST; carbono orgânico total, matéria orgânica (MO) e nitrogênio total (N) utilizando-se o analisador elementar TruSpec CNH LECO®; nitrogênio amoniacal nitrogênio orgânico, nitrato e nitrito pelo método volumétrico, fósforo total pelo método colorimétrico; potássio e sódio por fotometria de chama; cálcio e magnésio por titulação; enxofre; ovos de helmintos pelo método de FAUST e coliformes termotolerantes pelos tubos múltiplos.

Também foram analisados, no laboratório de Química Ambiental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido), os teores totais de substância contaminantes como níquel, chumbo, cromo, cobre, ferro, manganês e zinco pelo método de espectrometria de absorção atômica com atomização por chama de ar-acetileno no comprimento de onda específico para cada elemento químico analisado, no aparelho da marca Perkin Elmer, modelo Analyst 100; alumínio por titulometria e enxofre pelo método simplificado de cloreto de bário, segundo USEPA (2004).

Os resultados obtidos na caracterização do bio sólido foram comparados aos parâmetros determinados pela Resolução número 498/2020 do CONAMA e com a Instrução Normativa SARC nº 25, de 23 de julho de 2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para verificação do atendimento aos critérios para reúso agrícola.

Ainda, foi calculado o nitrogênio disponível para aplicação do bio sólido como adubação de cobertura ou incorporado ao solo. O cálculo foi realizado conforme a Equação 1 proposta pela Resolução nº 498/2020 do CONAMA, considerando a fração de mineralização igual a 20% (ou seja, que 20% foi mineralizado), uma vez que o bio sólido proveio de digestão anaeróbia.

$$N_{\text{disp}} = \left(\frac{FM}{100}\right) \times (N_{Kj} - N_{NH3}) + 0,5 \times (N_{NH3}) + (N_{NO3} + N_{NO2}) \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

FM = fração de mineralização do nitrogênio (%);

N_{Kj} = nitrogênio de Kjeldahl ($mg\ kg^{-1}$);

N_{NH_3} = nitrogênio amoniacal ($mg\ kg^{-1}$);

$N_{NO_3} + N_{NO_2}$ = nitrato e nitrito ($mg\ kg^{-1}$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, que apresenta a composição química e características do biossólido estudado, se observa que o teor de carbono orgânico (CO) encontrado foi de 20,2 % ($202,0\ g\ kg^{-1}$) e, segundo a IN nº 25 do MAPA, este pode ser classificado como fertilizante orgânico, uma vez que se exige um mínimo 15% desse componente. O teor de matéria orgânica (MO) encontrado foi de $348,25\ g\ kg^{-1}$ (34,825%) e, como a Resolução CONAMA 498/2020 e a Instrução Normativa nº 25 do MAPA não estabelecem limites para os teores dessa componente, o biossólido pode ser reutilizado para fins agrícolas, tendo em vista que, segundo Guimarães, Cordeiro e Vitorino (2018) e Deus *et al.* (2020) a MO melhora propriedades do solo, como a retenção de água, a estabilidade de agregados e a fertilidade.

Tabela 1. Composição química e características do biossólido da ETE Centro da Compesa de Petrolina (PE) e limites permitidos pelas normas brasileiras¹

Composição química e características	Teor detectado	Limite estabelecido pelo MAPA
Carbono orgânico (%)	20,2	> 15
Matéria orgânica ($g\ kg^{-1}$)	348,25	Não há limite
Nitrogênio total (%)	17,84	> 0,50
C/N	1,13	< 20
Nitrogênio amoniacal ($mg\ kg^{-1}$)	260,40	Não há limite
Nitrogênio orgânico ($mg\ kg^{-1}$)	178139,60	Não há limite
Nitrato ($mg\ kg^{-1}$)	987,87	Não há limite
Nitrito ($mg\ kg^{-1}$)	0,00	Não há limite
Fósforo total ($g\ kg^{-1}$)	0,02	Não há limite
Potássio total ($g\ kg^{-1}$)	0,15	Não há limite
Cálcio total ($g\ kg^{-1}$)	0,74	Não há limite
Magnésio total ($g\ kg^{-1}$)	1,09	Não há limite
Enxofre total (%)	0,054	Não há limite

¹ Resolução CONAMA 498/2020 e IN nº 25 do MAPA. A Resolução CONAMA 498/2020 não limita os valores desses elementos químicos.

O teor de N total encontrado no biossólido foi de 17,84% (Tabela 1) e para uso desse produto, como fertilizante agrícola, a IN nº 25 do MAPA determina teor mínimo de 0,5 %. Desta forma, como o resíduo avaliado apresenta valor superior ao menor estabelecido, pode ser destinado para fins agrícolas. Este resultado corrobora com o encontrado por Abreu *et al.* (2019) e por Deus *et al.* (2020) que, ao analisarem biossólido originado de esgoto sanitário tratado com óxido de cálcio, detectaram 3,88% e 0,73% de nitrogênio, respectivamente, ou seja, os valores permitiam a classificação do resíduo como fertilizante agrícola. Sendo assim, esse resíduo pode ter destinação no uso agrícola, com a ressalva de que o excesso desse nutriente pode desequilibrar as relações N/K, N/P, por favorecer o desenvolvimento da parte aérea em detrimento ao sistema radicular, limitando a absorção desses elementos pelas raízes reservas; prolongando o ciclo de cultivo e reduzindo o índice de colheita (Nunes *et al.*, 2016; Pérez *et al.*, 2017).

A relação C/N encontrada para o biossólido foi de 1,13 e, segundo a Instrução Normativa nº 25, a relação carbono/nitrogênio (C/N) deve ser inferior a 20 para que um resíduo seja utilizado na agricultura. Essa relação diz respeito a eficiência no fornecimento de matéria orgânica ao solo. Quando a razão C/N é maior que o limite estabelecido os microrganismos consomem o carbono para sobreviver, diminuindo os processos de mineralização, acentuando a imobilização dos nutrientes e minimizando sua disponibilidade para as plantas (Almeida *et al.*, 2016). Assim, os dados confirmam que o biossólido analisado é fonte adequada de MO.

Também, foram analisados os teores de nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrogênio orgânico e nitrito (Tabela 1), que não possuem limites definidos pelas resoluções. Esses teores possibilitaram a determinação da Equação 1, que permitiu concluir que o material residual analisado possuía 659,76 g kg⁻¹ de nitrogênio disponível para aplicação no solo. Resultado superior aos detectados em estudo realizado por Moretti, Bertoni e Abreu Júnior (2015) e Abreu *et al.* (2019) que encontraram valores de 35 g kg⁻¹ e 38,8 g kg⁻¹ de nitrogênio no biossólido, respectivamente, evidenciando o potencial do resíduo como fonte de adubação nitrogenada.

A quantidade de nitrogênio encontrada exige cuidado na utilização agrícola desse biossólido, pois quantidades excessivas desse nutriente podem comprometer o desenvolvimento das plantas, pelo excesso de crescimento vegetativo e lento desenvolvimento reprodutivo, além do risco de contaminação de corpos hídricos por ser um elemento altamente lixiviável (Fiorini *et al.*, 2019).

Quanto ao elemento P, o biossólido analisado possui $0,02 \text{ g kg}^{-1}$, valor inferior ao detectado por Abreu *et al.* (2019) que encontraram $6,2 \text{ g kg}^{-1}$ de P. Embora as normas vigentes não estabeleçam limites para a quantidade do macronutriente, esse resíduo pode ser utilizado como fonte complementar de adubação fosfatada, tendo em vista esse ser um elemento exigido em altas quantidades pela maioria das plantas cultiváveis. Além disso, um possível excesso dificilmente se caracteriza em toxidez, pois, segundo Szara, Sosulski e Szymanska (2019) o P pode ser adsorvido ao solo, formando complexos de superfície de esfera interna com os minerais de argila, ficando indisponível para as plantas. Mas para Fontana *et al.* (2021) e Klein e Agne (2012) a adição desse elemento ao solo deve ser controlada, pois o excesso pode desestabilizar a relação P:Zn, reduzindo a absorção do zinco, por inibição competitiva ao se ligar com o cátion acompanhante do fosfato ou com o dihidrogenofosfato (H_2PO_4).

Para o elemento K, que não é limitado pelos órgãos responsáveis para reúso agrícola do biossólido, a quantidade encontrada neste estudo ($0,15 \text{ g kg}^{-1}$) foi inferior à detectada (17 g kg^{-1}) por Maia *et al.* (2018), bem como a encontrada por Abreu *et al.* (2019) que foi de 5 g kg^{-1} , além de ter sido menor que o teor de outros resíduos orgânicos, a exemplo do valor presente no esterco bovino ($0,351 \text{ g kg}^{-1}$), em estudo realizado por Silva *et al.* (2014). Segundo Abreu *et al.* (2019) e Gomes *et al.* (2021) a quantidade reduzida de K no biossólido ocorre devido à alta solubilidade do nutriente, que não se precipita no lodo, permanecendo dissolvido na água do processo de tratamento e sendo perdido quando a água do biossólido é drenada pela centrífuga decanter.

Os teores de Ca, Mg e S encontrados no biossólido foram de $0,74 \text{ g kg}^{-1}$, $1,09 \text{ g kg}^{-1}$ e $0,054\%$, respectivamente. Por não haver padrão definido para os teores desses nutrientes e, sendo estes indispensáveis ao desenvolvimento vegetal (Schmitt; Watanabe; Jansen, 2016), pelas funções na rigidez da parede celular, na formação da molécula de clorofila e na participação da síntese proteica, respectivamente; se torna promissora a utilização do biossólido como fonte de adubação complementar desses elementos (Fiorini *et al.*, 2017; Luengo *et al.*, 2018).

Os teores de Ca ($0,74 \text{ g kg}^{-1}$) e S ($0,054 \text{ g kg}^{-1}$) encontrados são inferiores aos detectados por Abreu *et al.* (2019) e Almeida *et al.* (2023) ao avaliarem biossólido proveniente de esgoto sanitário tratado por processo anaeróbico na ETE Alegria (RJ), que obtiveram valores de $2,4 \text{ g kg}^{-1}$ para cálcio e de 12 g kg^{-1} para enxofre; enquanto a quantidade do magnésio desse estudo ($1,09 \text{ g kg}^{-1}$) foi superior ao de Abreu *et al.* (2019) e de Almeida *et al.* (2023), em que ambos obtiveram valor igual a $0,1 \text{ g kg}^{-1}$.

A Tabela 2 apresenta os resultados de pH, umidade e relação SV/ST, parâmetros com padrão estabelecido pela Resolução CONAMA 498/2020 e IN n° 25 do MAPA.

Tabela 2. Características físicas e químicas do biossólido da ETE Centro da COMPESA e limites preconizados pelas normas brasileiras¹

Parâmetros do biossólido	Teor detectado	Limite permitido pelo CONAMA	Limite permitido pelo MAPA
pH	8,14	Não há limite	> 6,0
Umidade (m ³ m ⁻³ ou %)	10,99	Não há limite	< 70
Relação SV/ST ²	0,21	< 0,65	Não há limite

¹Resolução CONAMA 498/2020 e IN n° 25 do MAPA. ²Relação sólidos voláteis/sólidos totais.

O valor de pH (8,14) está dentro do limite estabelecido pela IN n° 25 do MAPA (mínimo de 6,0). O resultado encontrado se aproxima do obtido por Deus *et al.* (2020), que foi de 7,9, mas difere do pH ácido (4,2 e 5,45) detectado por Abreu *et al.* (2017) e Almeida *et al.* (2023), respectivamente. Essa diferença pode ser explicada pelo tratamento com óxido de cálcio durante o processo de higienização do biossólido da COMPESA (Petrolina (PE)), o que não ocorreu com o lodo analisado por Abreu *et al.* (2017), Almeida *et al.* (2023) e por Alonso *et al.* (2018). Entretanto, atenção deve ser dispensada a essa característica, para não haver elevação do pH do solo, pois acima do valor considerado ideal para uso agrícola (5,5-6,5), o solo apresentará as cargas negativas saturadas por bases, reduzindo a capacidade de troca de cátions (CTC), movendo as cargas H⁺ para a solução do solo, impossibilitando a adsorção dos nutrientes nas partículas do solo, o que os torna indisponíveis para as plantas e favorece a lixiviação (Maia *et al.*, 2022; Peixoto *et al.*, 2019). Tal faixa de pH, no solo, promove a disponibilidade adequada de macronutrientes e de micronutrientes para as plantas.

Para a umidade do biossólido se deve considerar que o valor limitante de água é estabelecido visando facilitar o manuseio e o transporte, além de reduzir a produção de chorume, de odores, de atividade microbiana e de vetores (Barbosa, 2018; Bhatt *et al.*, 2018; Cerqueira; Aisse, 2021). O resultado encontrado (10,99%) está dentro do limite estabelecido pela IN n° 25 do MAPA (máximo de 70%) e corrobora com estudo realizado por Deus *et al.* (2020) e Gomes *et al.* (2021) que detectaram umidade de 15% e 10%, respectivamente. Entretanto, não corrobora com estudo realizado por Ferraz e Poggiani (2014), que detectaram umidade de 81,59% em biossólido proveniente da estação de tratamento de esgoto de Barueri (SP). Entretanto essa diferença se explica pela desidratação em decanter centrífugo, seguida de disposição do biossólido da COMPESA em pátio de secagem para redução do teor de água.

A Resolução 498/2020 do CONAMA limita a relação SV/ST do resíduo, a qual deve ser inferior a 0,65 para ser considerado estável para reúso agrícola. Ou seja, o resíduo possui reduzida quantidade de agentes patogênicos, que está relacionada a um baixo potencial de produção de odores e chorume (Silva; Miki, 2017). Desta forma, o bioossólido estudado é adequado, uma vez que essa relação foi de apenas 0,21, diferentemente de pesquisa realizada por Oliveira, Duda e Fernandes (2014) que detectaram 0,79 como a menor relação SV/ST, impossibilitando a destinação desse bioossólido para fins agrícolas.

Na Tabela 3 estão descritos os teores de metais e os limites estabelecidos pelo CONAMA e pelo MAPA.

Tabela 3. Teores de metais no bioossólido da ETE Centro da COMPESA e limites preconizados pelas normas brasileiras¹

Metais	Teor detectado	Limite máximo estabelecido pelo CONAMA	Limite mínimo estabelecido pelo MAPA
Níquel (mg kg ⁻¹)	25,20	420	50
Chumbo (mg kg ⁻¹)	< LD	300	Não há limite
Cromo (mg kg ⁻¹)	8,70	1000	Não há limite
Cobre (mg kg ⁻¹)	44,20	1500	500
Zinco (%)	0,01	0,28	0,10
Ferro (%)	0,11	Não há limite	0,20
Manganês (%)	0,04	Não há limite	0,05
Sódio (mg kg ⁻¹)	334,00	Não há limite	Não há limite
Alumínio (%)	0,00	Não há limite	Não há limite

¹ Resolução CONAMA 498/2020 e IN n° 25 do MAPA. * LD = limite de detecção.

Segundo Freddi (2019), a composição química do bioossólido pode limitar seu reúso na agricultura, devido à presença de quantidades inaceitáveis de metais. Desse modo, se torna indispensável a avaliação cuidadosa e continuada dos valores desses elementos químicos. Milhome *et al.* (2018) destacam que o acúmulo desses pode contaminar os ecossistemas ambientais ou ser absorvido via água pelas plantas causando danos e morte a depender dos níveis de tolerância de cada espécie, além da possibilidade de entrar na cadeia alimentar e contaminar os animais e o ser humano.

O teor de Ni (25,2 mg kg⁻¹) está abaixo do valor máximo estabelecido pela Resolução CONAMA 498/2020 (420 mg kg⁻¹) permitindo sua destinação ao uso agrícola, assim como o valor encontrado por Almeida *et al.* (2023), que detectaram 40,2 mg kg⁻¹. Essa baixa quantidade é desejável, pois quando em altas concentrações, esse elemento pode inibir a absorção de ferro, cobre, manganês e zinco, pois sua assimilação pelas plantas ocorre pelos mesmos sítios de

absorção (Costa *et al.*, 2015). No entanto, ao avaliar o biossólido pelas exigências da IN nº 25 do MAPA, este não pode ser considerado um fertilizante agrícola, pois a porcentagem de níquel representa apenas 0,0025% do produto, valor abaixo do mínimo exigido pela instrução normativa (0,005%) para enquadrá-lo nessa classificação.

As quantidades de Pb, Cr e Cu, também, são estabelecidas pela Resolução CONAMA 498/2020 e, os valores encontrados no biossólido são muito inferiores aos valores máximos permitidos, evidenciando o reduzido potencial de contaminação de solo ou substrato por tais elementos, advindos do biossólido. Considerando que as características do lodo estão diretamente associadas ao tipo de efluente tratado que o originou (o esgoto sanitário), o qual não se origina de águas que contenham elevadas concentrações desses constituintes inorgânicos, é esperado que no lodo gerado na ETE COMPESA esses teores sejam baixos.

Resultados obtidos por Ferraz e Poggiani (2014), ao avaliarem biossólido da estação de tratamento de esgotos sanitários de São Miguel (SP), corroboram com esse estudo ao verificarem quantidades inferiores desses metais, tendo como base a Resolução CONAMA 498/2020.

E, ainda, ao analisar a quantidade de cobre presente no biossólido estudado, assim como de zinco, ferro e manganês, se percebe que, semelhantemente ao níquel, esses elementos tornam inadequado o uso desse material como fertilizante orgânico, por representarem apenas 0,004%, 0,01%, 0,11% e 0,04%, respectivamente, da composição do produto, quando a instrução normativa nº 25 do MAPA exige valores mínimos, respectivos, de 0,05%, 0,1%, 0,2% e 0,05% para enquadrá-lo nessa classificação. Entretanto, o suprimento desses elementos químicos pode ser realizado com a adição de outros fertilizantes.

As quantidades de sódio e de alumínio encontradas no biossólido (334 mg kg⁻¹ e 0,00 %, respectivamente) foram inferiores às detectadas em estudos realizado por Pereira e Garcia (2017) e Lopes *et al.* (2021), respectivamente, que obtiveram valor de 816 mg kg⁻¹ de Na e de 0,27 % de Al, ao analisar diversos resíduos de estações de tratamento de esgoto. Embora essas substâncias inorgânicas não estejam limitadas pela Resolução ou pela Instrução Normativa, ainda assim, se deve atentar às características do solo ou substrato em que poderia ser aplicado, devido ao potencial do Na em promover a salinização e, do Al em causar a acidificação com possível redução de disponibilidade de macronutrientes, especialmente P (Morselli *et al.*, 2022; Schmitt; Watanabe; Jansen, 2016).

Outros parâmetros que devem ser avaliados, antes de destinar o biossólido para fins agrícolas, são os microbiológicos, a exemplo dos coliformes termotolerantes e os ovos de helmintos, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros microbiológicos encontrados no biossólido da ETE Centro da COMPESA e limites preconizados pelas normas brasileiras¹

Parâmetros microbiológicos	Quantidade detectada	Limites permitidos para biossólido classe A	Limites permitidos para biossólido classe B
Coliformes termotolerantes (NMP g ⁻¹ de ST)	153,06	1000	1000000
Ovos viáveis de helmintos (g ⁻¹ de ST)	0,00	1	Não há limite

¹ Resolução CONAMA 498/2020 e IN n° 25 do MAPA.

Com relação aos parâmetros microbiológicos, no biossólido avaliado foram encontrados coliformes termotolerantes em quantidades reduzidas e nenhum ovo viável de helmintos, o que torna possível seu uso na agricultura. Esses resultados corroboram com estudo realizado por Abreu *et al.* (2017), que obtiveram valores de 0,04 coliformes por g⁻¹ de ST e 0,01 ovos viáveis de helmintos por g⁻¹ de ST, ao avaliar biossólido proveniente de áreas domiciliares e comerciais.

Analisando todos os resultados obtidos, percebe-se que o biossólido estudado atende aos parâmetros estabelecidos pela Resolução n° 498 do CONAMA, podendo, assim, classificá-lo como biossólido classe A.

4 CONCLUSÕES

As características físicas, químicas e microbiológicas do biossólido analisado o enquadram no padrão estabelecido pela Resolução n° 498 do CONAMA para reúso agrícola.

O biossólido atende aos limites de tolerância para todas as variáveis estabelecidas pela Instrução Normativa n° 25 de 2009 do MAPA para sua aplicação como composto orgânico destinado à agricultura, exceto pelos baixos teores dos micronutrientes níquel, cobre, zinco, ferro e manganês.

Tendo em vista as características físicas, químicas e microbiológicas do biossólido, este pode ser reutilizado para fins de condicionamento físico e fornecimento de nutrientes para o solo, além de contribuir para minimização de impactos ambientais provenientes de um possível descarte inadequado.

5 AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de estudo (Código Financiamento 001), a Universidade Federal do Vale do São Francisco e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) por disponibilizarem a estrutura física para realização das análises.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ABREU, A. H. M. de; ALONSO, J. M.; MELO, L. A. de; LELES, P. S. dos S.; SANTOS, G. R. dos. Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 591-599, maio/jun. 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019108265.

ABREU, A. H. M. de; LELES, P. S. dos S.; MELO, L. A. de; OLIVEIRA, R. R. de; 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, out./dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509830300>.

AFÁZ, D. C. de S.; BERTOLAZ, K. B.; VIANI, R. A. G., SOUZA, C. F. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. **Rev. Ambient. Água**, Taubaté, v. 12, n. 1, jan./fev. 2017. DOI:10.4136/ambi-agua.1965.

ALMEIDA, L. S. de; FERREIRA, V. A. S.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1539-1547, set. 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900053.

ALMEIDA, R. S. de; BARONI, G. de R.; MELO, L. de; ABREU, H. M. de; LELES, P. S. dos S. É possível utilizar o biossólido na produção de mudas de progênes de candeia? **Rev. Agro. Amb.**, Maringá, v. 16, n. 1, e9768, jan./mar. 2023. DOI:10.17765/2176-9168.2023v16n1e9768.

ALONSO, J. M.; ABREU, A. H. M. de; MELO, L. A. de; LELES, P. S. dos S.; CABREIRA, G. V. Biosolids as substrate for the production of *Ceiba speciosa* seedlings. **Cerne**, Lavras, v. 24, n. 4, p. 420-429. 2018. DOI: 10.1590/01047760201824042568.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 th edition. American Public Health Association, Washington, D.C. 2012.

ARAÚJO, V. dos S.; SILVA, M. O.; BRITO, A. de S.; SOUSA, I. de L.; NUNES, F. C.; SOUZA, J. F. M. de; OLIVEIRA, I. V. de; SILVA, C. R. da; CARVALHO, F. I. M.; SILVA, J. N. da; SILVA, V. F. A.; SILVA, P. A. Lodo de esgoto e suas potencialidades agrícolas. **Res. Soc. Dev.**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 3, e14711326200. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26200>.

BARBOSA, J. G. Gestão ambiental em estações de tratamento de esgoto sanitário: alternativas para o lodo de esgoto. **Rev. Especialize On-line IPOG**, Goiânia, n. 15, v. 1, p. 1-15, jul. 2018. Disponível em: <https://ipog.edu.br/wp-content/uploads/2020/11/jessica-goncalves-barbosa-pagyn12-175131614.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2023.

BHATT, D.; SHRESTHA, A.; DAHAL, R. K.; ACHARYA, B.; BASU, P.; MACEWEN, R. Hydrothermal carbonization of biosolids from waste water treatment plant. **Energies**, Basel, n. 11, v. 2286, 2018, p. 1-10. DOI:10.3390/en11092286.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 498 de 19 de agosto de 2020**. “Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências”. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 19 de agosto de 2020.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária de Abastecimento – MAPA. **Instrução Normativa nº 25**. Aprova definições, especificações e as garantias dos fertilizantes orgânicos, simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Diário Oficial da União. Brasília, 23 de julho, 2009.

CERQUEIRA, P. L. W.; AISSE, M. M. Custos de processamento de lodo em estações de tratamento de esgoto com reatores anaeróbios de manto de lodo e pós-tratamento aeróbio: subsídios para estudos de concepção. **Eng. Sanit. Ambient.**, Curitiba, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, p. 251-262, mar./abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190244>.

COSTA, D. F.; MACHADO, V. J.; SOARES, L. H.; FAGAN, E. B.; REIS, M. R. dos; CABRAL, E. M. A. Utilização níquel na cultura da soja. **Rev. Cerr. Agrociên.**, Patos de Minas, n. 6, p. 31-44, dez. 2015.

DEUS, A.; ABRAHÃO, R.; SANTOS, R. F. dos; ARAÚJO, L. de S.; CARNEIRO, K. de A. A. Efeito do biossólido de indústria têxtil para o solo e para a produção do capim-elefante. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 50331-50348, jul. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-620.

FERRAZ, A. de V.; POGGIANI, F. Biomassa, nutrientes e metais pesados em raízes de eucaliptos adubados com diferentes lodos de esgoto. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 311-320, abr./jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760.201420021491>.

FIORINI, I. V. A.; PEREIRA, C. S.; PEREIRA, H. D.; RESENDE, F. R.; RESENDE, E. L.; SILVA, A. A. da. Avaliação do efeito residual do nitrogênio liberado pelos restos culturais da soja na produtividade do milho segunda safra. **Revista Agrogeoambiental**, v. 11, n. 3, set. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v11n320191336>.

FIORINI, I. V. A.; PINHO, R. G. V.; PEREIRA, H. D.; PIRES, L. P. M.; FIORINI, F. V. A.; RESENDE, E. L. Acúmulo de matéria seca, clorofila e enxofre foliar em milho adubado com

diferentes fontes de enxofre. **J. Bioen. Food Sci.**, Macapá, v. 4, n. 1, p. 1-11. 2017. DOI 10.18067/jbfs.v4i1.114.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, J. J. S. dos; DONAGEMMA, G. K.; SANTOS, O. A. Q. dos. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de textura arenosa com fertilidade construída. *Rev. Agrogeoambiental*, Pouso Alegre, v. 13, n. 3, p. 606-614, set. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v13n320211639>

FREDDI, L. A. Riscos associados à aplicação do lodo de esgoto na agricultura. **Rev. Cient. ANAP Brasil**, Tupã, v. 12, n. 24, p. 50-60. 2019. DOI: <https://doi.org/10.17271/19843240122420191982>.

GOMES, R. F.; LELES, P. S. Dos S.; DIAS, M. M. M.; NUNES, Y. I.; DELGADO, L. B.; LOPES, L. N. Biossólido de estações de tratamento de esgotos como adubação de plantio para restauração da mata atlântica. **Adv. For. Sci**, Cuiabá, v.8, n.4, p.1583-1590, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34062/afs.v8i4.10081>.

GUIMARÃES, J. C. S.; CORDEIRO, J.; VITORINO, D. C. F. R. Utilização do lodo de esgoto na agricultura: uma análise cienciométrica. **Res., Soc. Dev.**, Vargem Grande Paulista, v. 7, n. 9, e479391, p. 2525-3409. 2018. DOI: <https://doi.org/10.17648/rsdv7i9.391>.

KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 8, n. 8, p. 1713-1721, set.-dez. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/223611706430>.

LOPES, L. N.; SILVA, O. M. das C.; VIEIRA, A. V. G.; RIBEIRO, J. G.; SANTANA, J. E. da S.; LELES, P. S. dos S. Potencial do biossólido como adubação de plantio para *Schinus terebinthifoli* Raddi. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 64, 2021.

LUENGO, R. de F. A.; BUTRUILLE, N. M. dos S.; MELO, R. A. de C.; SILVA, J. da; MALDONADE, I. R.; COSTA JÚNIOR, A. D. Determinação de minerais no solo e análise de folhas de couve produzida em Brasília. **Braz. J. Food Technol.**, Campinas, v. 21, e2017141, p. 1-9. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.14117>.

MAIA, F. C.; LIMA, S. O.; BENÍCIO, L. P. F.; FREITAS, G. A. de; FURLNA, J. C. Qualidade física do solo após aplicação de lodo de esgoto. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 4, p. 345-351, jul./ago. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5088>.

MAIA, J. C. de S.; FERREIRA, P. A.; BASÍLIO, J. P.; MARTINS, L. A.; CECCHIN, L. Efeitos de diferentes plantas de cobertura e extrato orgânico sobre atributos químicos de um solo franco argilo arenoso. **Res., Soc. Dev.**, v. 11, n. 14, e158111435994, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.35994>.

MILHOME, M. A. L.; HOLANDA, J. W. B.; de ARAÚJO NETO, J. R.; NASCIMENTO, R. F. do. Diagnóstico da contaminação do solo por metais tóxicos provenientes de resíduos sólidos urbanos e a influência da matéria orgânica. **Rev. Virtual Quim.**, Niterói, v. 10, n.1, 2018, p. 59-72., jan./fev. DOI: 10.21577/1984-6835.20180007.

MOREIRA, S. de F.; SANOTS, S. D. de O.; SARDINHA, A. S.; PEREIRA JÚNIOR, A. O lodo de ETE como alternativa para a recuperação do solo em áreas degradadas. **Braz. Ap. Sci. Rev.**, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 1564-1585, mai./jun. 2019. DOI: 10.34115/basrv3n3-006.

MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena**, Aracajú, v. 18, n.5, p. 1-11, mai. 2022. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.051701>.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU JÚNIOR, C. H. Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em Nitossolo Háptico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1796-1805. 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20150082.

NUNES, A. R. A.; FERNANDES, A. M.; LEONEL, M.; GARCIA, E. L.; MAGOLBO, L. A.; CARMO, E. L. do. Nitrogênio no crescimento da planta e na qualidade de raízes da mandioquinha-salsa. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 46, n. 2, p. 242-247. fev. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150339>.

OLIVEIRA, G.; KIKKAWA, L. S.; SANTOS, A. M. dos. Reutilização de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) na Região de Suzano, São Paulo, Brasil: alternativas e oportunidades. **Rev. Bras. Gest. Amb. Sustent.**, João Pessoa, v. 5, n. 11, p. 999-1007. dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.21438/rbgas.051115>

OLIVEIRA, R. A. de; DUDA, R. M.; FERNANDES, G. F. R. Reator anaeróbio compartilhado para o tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 323-391, out./dez. 2014. DOI: 10.1590/S1413-41522014019000000336.

PEIXOTO, D. J. G.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; MIOLA, V.; PEREIRA, N.; ANDRADE, E. A. de. Atributos químicos de solo após incubação com produtos com cálcio e magnésio. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.8, n.3, p. 62-68, 2019. DOI: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v8i3.21208>

PEREIRA, A. C. A.; GARCIA, M. L. Efeitos da disposição de lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE) de indústria alimentícia no solo: estudo de caso. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 531-538, maio/jun. 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522016152945.

PÉREZ, C. D. P.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; FREITAS, A. S.; SILVA, M. G. da. Nitrogênio e potássio na intensidade da mancha aureolada do cafeeiro em solução nutritiva. **Coffee Sci.**, Lavras, v. 12, n. 1, p. 60-68, jan./mar. 2017. DOI: <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/8261>.

SCHMITT, D. E.; VENDRUSCULO, R. B.; GATIBONI, L. C.; SANTIN, D.; WENDLING, I.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; COLDEBELLA, F. D. Teor crítico de enxofre no solo para o estabelecimento de clones de erva-mate no Sul do Brasil. **Rev. Ciênc. Agrovet.**, Lages, v. 17, n. 1, p. 70-76. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711712018070>

SCHMITT, M.; WATANABE, T.; JANSEN, S. The effects of aluminium on plant growth in a temperate and deciduous aluminium accumulating species. **AoBP**, Oxônia, v. 6, plw065. 2016. DOI: 10.1093/aobpla/plw065.

SILVA, B. S. da; MIKI, M. K. Práticas operacionais e de empreendimentos – Análise crítica dos instrumentos legais do ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA) para uso agrícola do lodo de esgoto. **Rev. DAE**, São Paulo, v. 25, p. 54-70, jan./abr. 2017. DOI: 10.4322/dae.2016.020

SILVA, J. J. M.; CAVALCANTE, L. F.; NASCIMENTO, J. A. M.; DINIZ, B. L. M. T.; SOUTO, A. G. L. Esterco bovino e potássio na composição mineral de plantas de noni. **Ci. Fl.**, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 1021-1030, out.-dez. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509816615>.

SZARA, E.; SOSULSKI, T.; SZYMANSKA, M. Impact of long-term liming on sandy soil phosphorus sorption properties. **Soil Sci. Ann.**, Polônia, v. 70, n. 1, p. 13-20. 2019. DOI: 10.2478/ssa-2019-0002.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A guide to the biosolids risk assessments for the EPA Part 503 rule**. Washington: Office of Wastewater Management, EPA/832-B-93-005, 1995. 2004.