

Avaliação do processo de compostagem de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto: legislação, parâmetros biológicos, comportamento dos nutrientes, e condições físico-químicas

Evaluation of the sludge composing process from wastewater treatment process: legislation, biological parameters, nutrient behavior, and physicochemical conditions

Suzete Maria Lenzi Caminada^{1*} , Miriam Moreira Bocchiglieri² ,
Wanderley da Silva Paganini³ , Edivaldo Domingues Velini⁴ 

RESUMO

A necessidade de recuperação de solos erodidos e empobrecidos tem sido amplamente estudada, tendo como uma das práticas recomendadas para essa finalidade a utilização de lodos de esgotos em solos agrícolas, considerando-se a abordagem de avaliação de risco, para garantir a segurança ambiental e a saúde pública. A utilização do lodo como insumo agrícola promove a reciclagem dos nutrientes, fornecendo, ainda, matéria orgânica ao solo, estocando carbono na forma de compostos estáveis e não liberando CO₂ na atmosfera. A partir da utilização agrícola do lodo, podem-se reduzir os custos de transporte e disposição final dos lodos em aterros, por exemplo. Alguns casos viabilizados no país mostram que o interesse é grande por parte dos produtores agrícolas, tanto em larga escala de produção quanto em relação aos produtores familiares, visto que o biossólido produzido pode reduzir em torno de 60% o consumo de fertilizantes fosfatados. Diante do potencial brasileiro para o desenvolvimento da compostagem do lodo de esgoto com finalidades agrícolas, o objetivo deste trabalho foi acompanhar e avaliar o desenvolvimento do processo de compostagem utilizando o lodo desaguado proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) visando apresentar informações que possam contribuir para aprimorar os conhecimentos sobre essa prática.

Palavras-chave: compostagem; biossólido; Lodo de ETE.

ABSTRACT

The need to recover eroded and impoverished soils has been widely studied. One of the recommended practices for this purpose is using sewage sludge in agricultural soils, considering the risk assessment approach to ensure environmental safety and public health. Using sludge as an agricultural input promotes the recycling of nutrients, providing organic matter to the soil, storing carbon in the form of stable compounds, and not releasing CO₂ into the atmosphere. From the agricultural use of sludge, transport costs and final disposal of sludge in landfills, for example, can be reduced. Some cases carried out in the country show the interest in agricultural producers, both in large-scale production and concerning family producers, since the biosolid produced can reduce the consumption of phosphate fertilizers by around 60%. Given the Brazilian potential for developing sewage sludge composting for agricultural purposes, the objective of this work was to monitor and evaluate the development of a composting process using dehydrated sludge from WWTP to present information that can contribute to improving knowledge about this practice.

Keywords: compost; biosolid; STS sludge.

¹Doutora em Ciências pela Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo (USP).

²Doutora em Ciências pela Faculdade de Saúde Pública da USP.

³Professor Livre Docente da Faculdade de Saúde Pública da USP.

⁴Professor Titular da Faculdade Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP).

*Endereço para correspondência: Avenida Antártica, 720 - Casa 109 - Santa Úrsula, Jaguariúna-SP, CEP: 13918-000. e-mail: slcaminada@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a destinação final do lodo de esgotos permaneceu em segundo plano considerável período e, em muitos casos, o lodo foi acumulado nas áreas próximas às estações, resultando em riscos ambientais imprevisíveis. As características do lodo gerado são dependentes do tipo de esgoto, do processo e do grau de tratamento, do tipo de lodo (primário, secundário, terciário), sendo que sua destinação ocorre em função do processo de tratamento utilizado, de seu condicionamento, de sua desidratação e estabilização, bem como da quantidade e da qualidade produzida (TSUTIYA *et al.*, 2002).

Uma das questões mais importantes para a gestão de águas residuárias diz respeito ao tratamento e à disposição ambientalmente correta e econômica para o lodo de esgoto, seja o tratamento biológico ou o físico-químico. Entre as muitas estratégias utilizadas para solucionar tal problema, o uso agrícola é o mais econômico e ambientalmente conveniente. Seu alto teor de carbono orgânico (C.O), nitrogênio (N) e fósforo (P) faz com que ele se torne valiosa fonte de nutrientes para a agricultura (TSUTIYA *et al.*, 2002; NUVOLARI, 2009).

Considerando-se a utilização de biossólidos na agricultura, a compostagem é um dos procedimentos mais eficientes de estabilização de lodo de esgotos, visto que se trata de um processo de bio-oxidação aeróbia, exotérmica, de um substrato orgânico heterogêneo no estado sólido. Realizado por uma população complexa de microrganismos, é caracterizado por ter como produto água e CO₂, com simultânea liberação de matéria orgânica, que se estabiliza após a maturação. O composto maturado é um produto estável e rico em matéria orgânica formada por colóides húmicos que atuam sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. As temperaturas do processo eliminam os microrganismos patogênicos e permitem manuseio do composto sem risco para o ambiente (CARVALHO, 2002).

Carvalho (2002) descreve o processo no qual o lodo é misturado com um agente estruturante, para melhoria de suas propriedades físicas, aumentando a porosidade, sendo a mistura distribuída em leiras triangulares com dimensões variáveis. O tipo de material estruturante utilizado, assim como a proporção (lodo: material estruturante), deve ser avaliado considerando-se as diferentes características físicas e químicas do lodo a ser utilizado no processo, devido à grande variabilidade na composição e nas propriedades do lodo. O controle de temperatura e a periodicidade de revolvimento da leira são fundamentais para que o processo ocorra de forma controlada e atenda aos parâmetros estabelecidos pela legislação quando o biossólido atinge a estabilização.

As leiras são revolvidas periodicamente por tratores apropriados ou pá carregadeiras. Nesse revolvimento são eliminados os gases produzidos na fermentação e é fornecido ar ao sistema: por difusão e convecção, o material a ser compostado recebe o oxigênio necessário para as reações aeróbias da compostagem, sendo essa a descrição mais simples do sistema, produzindo um composto de boa qualidade, quando bem monitorado.

Brady e Weil (2013) mostram a relação de nutrientes essenciais e o desenvolvimento de plantas, mencionando que o nitrogênio é indispensável para que as plantas possam fazer uso do carboidrato; o fósforo auxilia nos processos de fotossíntese, fixação de nitrogênio, floração, frutificação e sazonalidade; e o potássio é essencial para a absorção de água pelas raízes.

As propriedades do biossólido são semelhantes às de outros produtos orgânicos usados normalmente na agricultura, portanto, em termos de resultados agrônomicos, o biossólido poderia ser aplicado à maioria das culturas. Porém, por precaução, principalmente em relação aos patógenos, o uso de biossólidos

(mesmo higienizados) para horticultura e demais produtos consumidos crus que tenham contato direto com o biossólido permaneceu vetado por muitos anos. Segundo Mota (2006), as culturas mais recomendadas para a aplicação do biossólido são aquelas cujos produtos são consumidos após a industrialização, tais como milho, feijão, soja, canola, trigo, aveia, forrageiras para adubação verde, dentre outros. Somente com a publicação da Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020) foram estabelecidos critérios e condições que permitem a aplicação de biossólidos no cultivo de alimentos consumidos crus.

A Figura 1 apresenta os principais destinos para o lodo observados na União Europeia (UE). Verifica-se que países como Portugal, Irlanda, Reino Unido, Luxemburgo e Espanha destinam mais de 75% do lodo gerado para o uso agrícola. Atualmente, um programa intitulado “*National Biosolid Research Program — NBRP*” (GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA, 2012) está em andamento, sendo um de seus objetivos validar ou adequar os padrões de qualidade existentes.

Diversas tecnologias para o processamento do lodo são utilizadas nos países da UE. A escolha predominante é a aplicação direta na agricultura, seguida de compostagem, sendo que há uma variação entre os países da UE quanto a essas práticas, variando entre 0 (Malta, Eslovênia, Eslováquia) e 80% (Irlanda). Na Bulgária, mais de 50% do lodo é utilizado na agricultura, de acordo com dados de 2015 (HUDCOVÁ *et al.*, 2019).

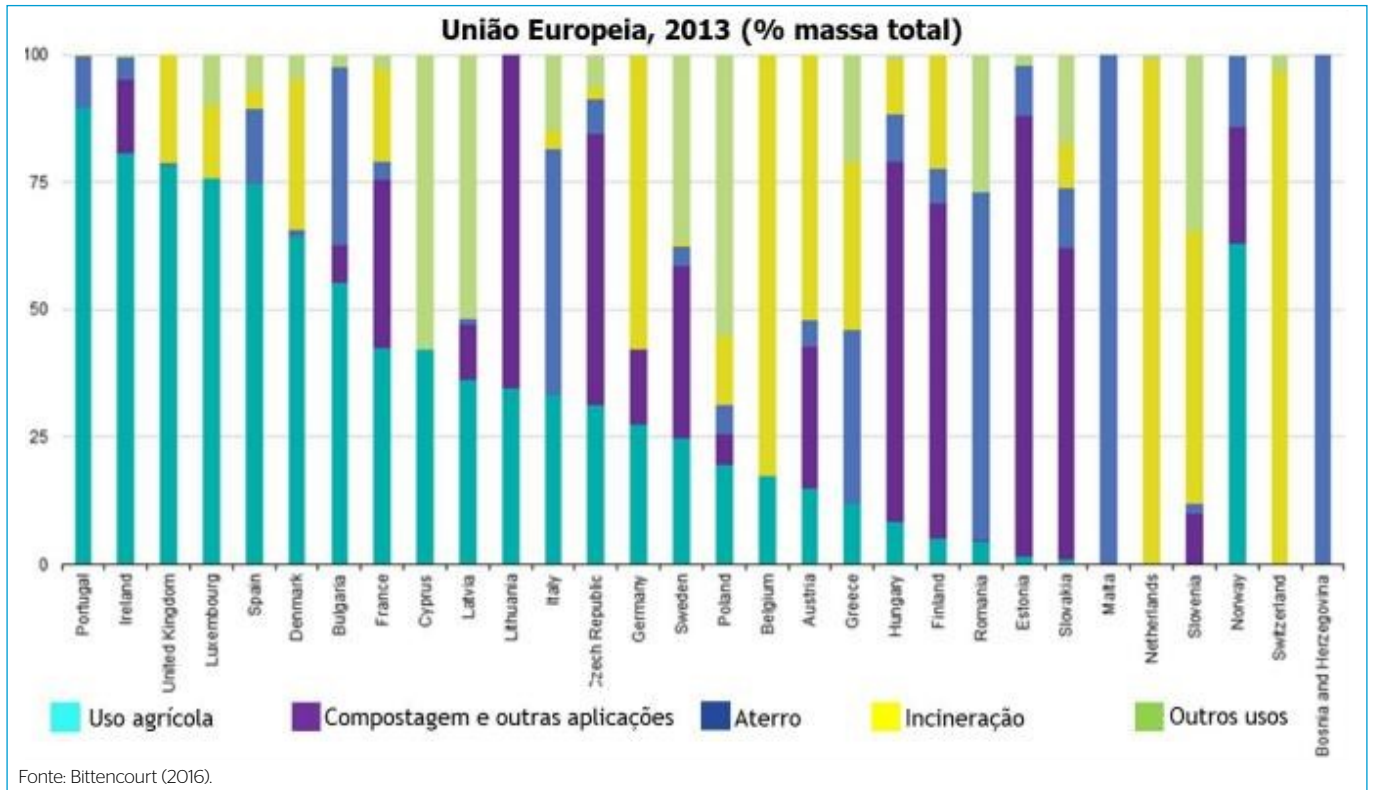
A Figura 2 apresenta o cenário brasileiro em relação à destinação do lodo. Verifica-se que, com exceção ao Paraná, há poucas iniciativas para reaproveitamento do lodo. Embora a disposição do lodo de esgoto para a agricultura seja uma das alternativas mais viáveis, a presença de elementos-traço, microrganismos patogênicos, poluentes orgânicos persistentes e, até mesmo, nutrientes encontrados no lodo representa fator limitante para sua destinação agrícola, principalmente no que se refere aos riscos de contaminação dos solos e transferência de nutrientes aos seres humanos por meio da cadeia alimentar, riscos de lixiviação dos nutrientes e riscos de infecção por patógenos (COSCIONE *et al.*, 2010).

Segundo Andreoli *et al.* (2014), os elementos que mais oferecem risco são: As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Mo, Pb, Se, Zn e Co. Embora os elementos-traço possam ser tóxicos para as plantas e os animais em determinadas concentrações, a quantidade presente nos biossólidos oriundos de esgotos domésticos não representa risco para os organismos vivos.

Com relação aos patógenos no lodo, Andreoli *et al.* (2014) discutem que a quantidade presente depende das condições socioeconômicas de cada país e região, das condições sanitárias nas quais foi gerado e dos métodos de tratamento aplicados.

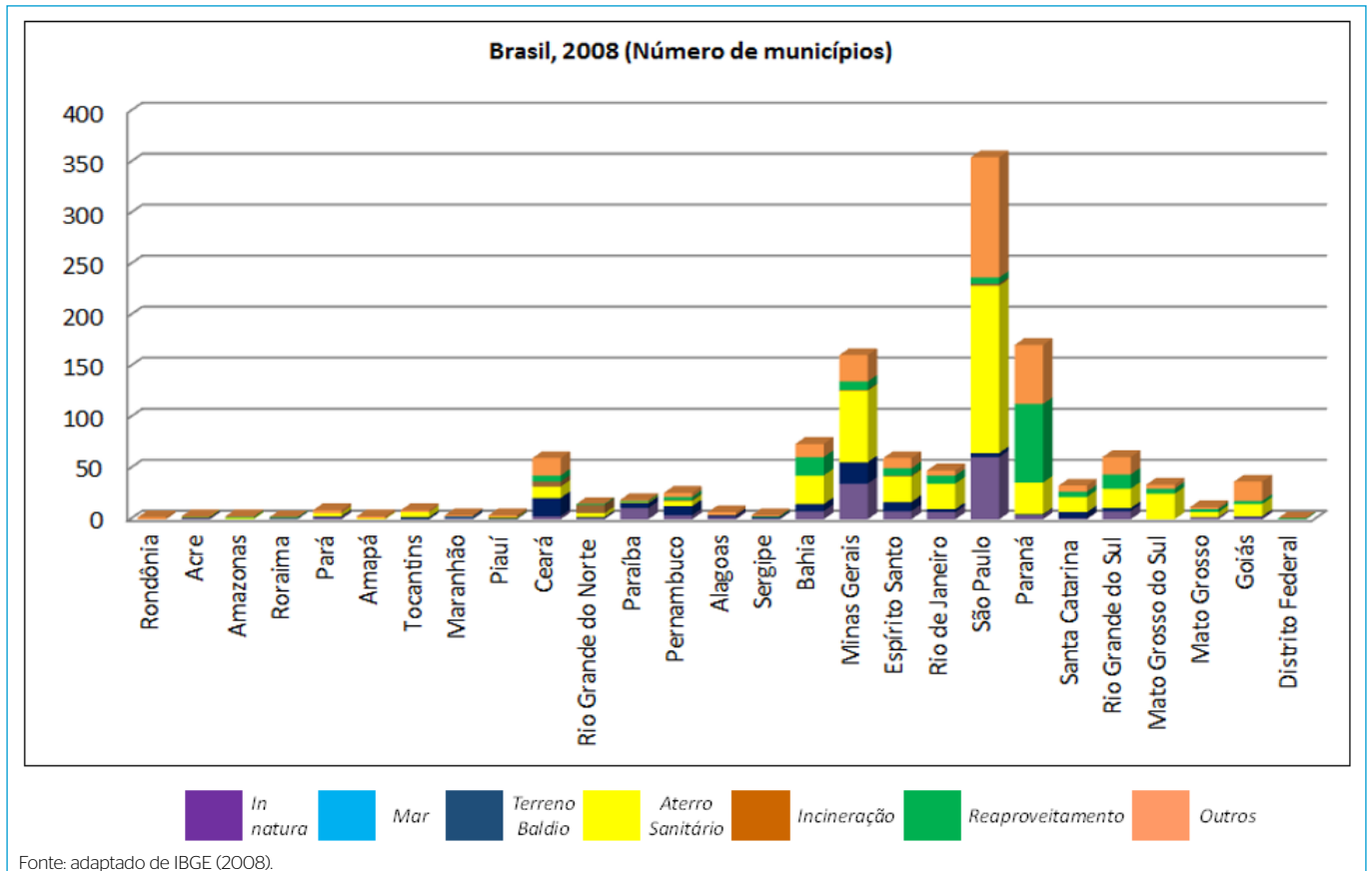
Em seu estudo, Guimarães *et al.* (2018) demonstram grande interesse por publicações que abordem o tema “poluentes orgânicos persistentes”, sendo os compostos farmacêuticos um dos mais citados (10 – 15% dos artigos): 12% dos artigos apontam a preocupação com o uso do lodo de esgoto contaminado com esses compostos. Segundo Saito (2007), apesar dos testes realizados com os produtos, não há informações sobre a ecotoxicologia desses poluentes, mas há grande preocupação com o uso prolongado e em larga escala.

Nesse contexto, Rodrigues *et al.* (2018) realizaram uma análise científica e constataram que os produtos farmacêuticos mais encontrados nas publicações entre os anos 1998 e 2016 foram: carbamazepina, acetaminofeno, diclofenaco, cafeína, ibuprofeno e triclosan. Dentre os hormônios, destacam-se nonifenol, 17-beta-estradiol, estrona, 17-alfa-etinilestradiol, estriol e bisfenol A.



Fonte: Bittencourt (2016).

Figura 1 - Destinação do lodo de estação de tratamento de esgoto nos países da Comunidade Europeia.



Fonte: adaptado de IBGE (2008).

Figura 2 - Destinação do lodo de estações de tratamento de esgotos no Brasil.

A movimentação dos contaminantes na água, no solo e no ar, bem como na interface entre esses diferentes compartimentos, é determinada por processos relacionados às propriedades químicas das substâncias e dos compartimentos ambientais. Caminada (2021) aborda o comportamento dos fármacos Atenolol, Carbamazepina, Clonazepam, Ibuprofeno, Paracetamol, Sinvastatina e Fluoxetina em biossólido, antes e após o processo de biorremediação por compostagem. Saito (2007) destaca que os países dão ênfase aos microrganismos e às substâncias inorgânicas, mas não estabelecem diretrizes para os poluentes orgânicos no que se refere à destinação agrícola do lodo.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020 (BRASIL, 2020), estabelece critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009, estabeleceu normas sobre as especificações e garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Vale destacar que as abordagens entre CONAMA e MAPA diferem entre si: para o MAPA, o biossólido é um produto; já para o CONAMA, o lodo é tratado como um resíduo, estando, por isso, sujeito a uma série de controles prévios à sua aplicação em solo.

A utilização de lodo na agricultura na UE é regulada apenas pelos limites dos metais pesados (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn) listados na Diretiva Conselho Europeu 86/278/EEC (COUNCIL DIRECTIVE, 1986). Vários países europeus introduziram requisitos mais rigorosos do que a diretiva e adotaram limites para as concentrações de outros metais pesados, compostos orgânicos sintéticos e contaminação microbiana. Atualmente, discute-se a necessidade de atualizar esses regulamentos, tendo em conta os atuais riscos associados à aplicação de lodo em terrenos agrícolas, com a possibilidade de utilizar testes ecotoxicológicos para avaliação. A **Tabela 1** apresenta resumidamente as legislações e políticas de uso do lodo de esgotos em diferentes países.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido, em escala real, na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Lageado, localizada em Botucatu, no estado de São Paulo. A ETE utiliza o processo de tratamento em nível secundário, sendo constituída pelas seguintes unidades: tratamento preliminar (gradeamento e caixa de areia), tanque de equalização de vazão, reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA), tanque de aeração, decantadores secundários e desinfecção do efluente final, que é liberado em um corpo hídrico classificado como Classe II pelo Decreto Estadual nº 10.755/1977. O lodo gerado na estação é desaguado por processo mecânico de centrifugação até atingir teor de sólidos entre 20 e 25%. A produção de lodo é de aproximadamente 15 m³.dia.

2.2. Montagem da leira de compostagem

No presente estudo, adotou-se o processo de compostagem por leiras revolvidas. Desse modo, preparou-se uma leira específica para a pesquisa, com dimensões aproximadas de 2,75 × 8,0 × 0,85 m (**Figura 3**), contendo o lodo desaguado da ETE Lageado e material proveniente de podas de árvore (fonte de carbono), na proporção de 1:1. O volume total da leira foi de aproximadamente 20 m³,

sendo realizado o revolvimento da leira em três datas: 15 de maio de 2019, 07 de junho de 2019 e 24 de junho de 2019.

2.3. Preparo e conservação das amostras de lodo gerado na estação de tratamento de esgoto

O procedimento de amostragem adotado para o lodo foi a coleta simples, realizada segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004), conforme indicado a seguir:

- Amostragem de extrato proveniente do lodo bruto, coletada no afluente do adensador.
- Amostragem de extrato proveniente do lodo centrifugado/desaguado.
- Amostragem do material compostado, considerando-se o acompanhamento do processo de em leira de compostagem durante 75 dias, sendo que as amostras foram coletadas no início do processo (tempo zero), com 15, 30, 45, 60 e, posteriormente, 75 dias, garantindo-se a estabilização do biossólido compostado.

Após coletadas, as amostras foram identificadas, armazenadas em recipientes com tampa e transportadas para o Laboratório de Solos na Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), *Campus* Lageado, na cidade de Botucatu (SP). Os locais de amostragem do lodo podem ser visualizados na **Figura 4**.

2.4. Metodologia adotada para a determinação dos parâmetros de acompanhamento e monitoramento da leira de compostagem

A determinação do teor de umidade das amostras foi realizada no Laboratório da ETE Lageado, utilizando-se o analisador de umidade por infravermelho-GEHAKA, modelo IV-2000. A determinação dos demais parâmetros avaliados foi realizada no Laboratório de Solos da FCA, da UNESP, *Campus* Botucatu (SP). As amostras foram analisadas sem necessidade de conservação, visto que foram coletadas e realizadas no mesmo dia. O controle da temperatura foi realizado diariamente, considerando-se a profundidade em três pontos (fundo, meio e topo), assim como o comprimento, no início, no meio e no final da leira de compostagem, possibilitando calcular a média dos 9 pontos amostrados/dia. As metodologias utilizadas para determinação dos parâmetros de acompanhamento e monitoramento da leira de compostagem (**Tabela 2**) foram realizadas de acordo com o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos e o Manual Laboratório Nacional de Referência Vegetal – Métodos Oficiais (LANARV, 1988), o qual foi utilizado para determinação da matéria orgânica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Determinação e quantificação analítica do biossólido compostado (Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”)

Obtiveram-se dados primários durante o período de acompanhamento do processo de compostagem, com duração de 75 dias. Realizaram-se 6 campanhas de amostragem, a cada 15 dias, nas quais foram determinadas as propriedades físico-químicas e a composição dos nutrientes disponíveis. A umidade é um dos parâmetros físicos mais monitorados nos processos de compostagem, por ser de extrema importância para a eficiência da atividade microbiana, devendo

Tabela 1 – Comparação do estado atual e perspectivas futuras na legislação de gestão de lodo de esgoto em diversos países.

	Japão	EUA	Austrália	Nova Zelândia	UE27	Reino Unido	Alemanha	Grécia
Leis Fundamentais na Gestão de lodo de esgotos	Nova Lei de Esgoto (década de 1970) Lei de Fertilizantes (1950) Lei de Gestão de Resíduos e Limpeza Pública (1970) Lei de Contramedidas de Contaminação do Solo (2001) Lei de Gestão de Resíduos e Limpeza Pública (SS e cinzas)	Lei Federal de Controle da Poluição da Água (1972) Padrões para o Uso e Descarte de Lodo de Esgoto (regra 40 CFR Parte 503, 1993), Regra 40 CFR Partes 261 e 268 (para avaliando a toxicidade do resíduo de incineração de cinzas residuais) Regra do NHSM para incineração de SS (2011)	Lei Federal de Água Limpa (década de 1970) e as diferentes Diretrizes Estaduais para aplicação de Biossólidos em terra Lei Estadual de Fertilizantes e Lei de Resíduos	Diretrizes da Nova Zelândia para aplicação de Biossólidos em terra (2003)	Diretiva de Lamas de Esgoto (1986) Diretiva de Tratamento de Águas Residuais Urbanas (UWWTD, 91/271/EEC) Aterro de Resíduos (Diretiva 99/31/EC) Diretiva de Incineração de Resíduos (Diretiva 2000/76/EC)	Regulamentos de Uso de Lodo na Agricultura (1989) Código de Boas Práticas Agrícolas (1993) Matriz Segura de Lodo (SSM) (1998) Lei de Proteção Ambiental para incineração e aterro de SS (1990)	Portaria de Lodo de Esgoto (1992) Lei de Fertilizantes (1977) Portaria de Fertilizantes, Lei Federal de Controle de Emissões (1990) Lei de Resíduos (1994) Instruções Técnicas sobre Resíduos para Descarte Térmico SS (1993) Substância Fechada e Gerenciamento de Resíduos (alterada em 2012)	Métodos, condições e restrições sobre o uso na agricultura de lodo derivado do tratamento de resíduos domésticos e águas residuais municipais (1991) 'Plano Nacional de Gestão Biológica de Lodos' (2010, rascunho)
Eliminação oceânica	Proibido desde 2004	Proibido desde 1982	Em abandono (1% em 2010)	Desencorajado (10% em 2010)	Proibido desde 1999	Proibido desde 1998	Proibido	Proibido desde 2000
Aterro	Permitido apenas para cinzas de incineração; sendo desencorajado	Sendo desencorajado	Abandonado na maioria dos estados, exceto Virgínia	Principal método de descarte	Restrito para ser banido	Quase abandonado (<1%, 2010)	Aplicado somente quando matéria orgânica <3%	Desencorajado
Uso agrícola (parâmetros básicos inspecionados)	Não amplamente utilizado (carbonizado, seco e lodo compostado ou cinzas)	Uso principal (metal pesado, patógenos, redução atração vetores)	Uso principal (metal pesado, patógenos, redução atração vetores, contaminantes orgânicos)	Uso promovido, mas ainda escasso principal (metal pesado, patógenos, redução atração vetores, contaminantes orgânicos)	Uso principal (Metais pesados)	Uso principal (Metais pesados, patógenos)	Uso significativo, mas em declínio (Metais pesados, contaminantes orgânicos)	Promovido e crescente (Metais pesados)
Outros usos de aplicação no solo	Nenhum	Biossólido de 'Qualidade Excepcional' comercializado Paisagismo (composto)	Silvicultura, reivindicação de terras, minisites	Floresta, reivindicação de terras, minas	Paisagismo (composto)	Floresta, reivindicação de terras	Paisagismo (composto)	Produtos de compostagem de biossólidos
Tratamento térmico	Uso principal (altamente promovido >70%)	Uso moderado. Métodos térmicos cada vez mais promovidos considerando o uso de energia renovável	Não preferido, aplicação limitada	Não aplicado	Aumento, principalmente na UE12	Não preferido	Uso importante (aumentando ultimamente > 50%)	Uso importante recentemente (> 50%)
Recuperação de fósforo de lodo de esgotos	Aplicações comerciais altamente promovidas	Visto como uma necessidade, nenhuma medida especial tomada	Visto como uma necessidade	Ainda não	desenvolvido como uma alta prioridade	A ser desenvolvido	Desenvolvimento em larga escala. Os regulamentos estão em desenvolvimento.	Ainda não
Expectativa de mudanças na legislação	Incluir o uso de fósforo recuperado e energia renovável	Regras mais rígidas para aplicação no solo. A energia renovável e os métodos térmicos serão promovidos.	Minimização do descarte no oceano/aterros sanitários. Extensão de usos agrícolas - energia renovável	Minimização do descarte no oceano/aterros sanitários. Extensão de usos agrícolas - energia renovável	Regras mais rígidas para aplicação no solo e recuperação de fósforo. A energia renovável será promovida	A recuperação de fósforo das águas residuais pode ser um alvo futuro	Regras mais rígidas na agricultura. Regras para recuperação de fósforo de lodo de esgotos. Revisão da lei de fertilizantes. Regras de energia renovável	Minimização do descarte em aterros. Extensão dos usos agrícolas - energia renovável

Fonte: adaptado de Christodoulou e Stamatelato (2016).



Figura 3 - Instalação do sistema compostagem.

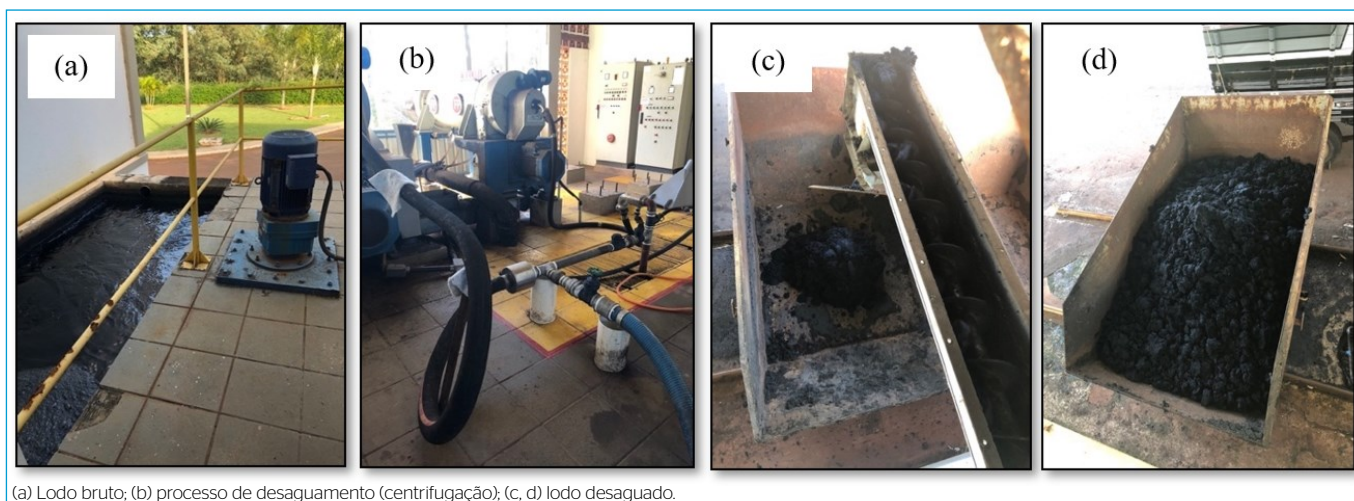


Figura 4 - Locais de amostragem referente ao lodo gerado estação de tratamento de esgoto.

Tabela 2 - Metodologias utilizadas nas para determinação dos parâmetros de acompanhamento e monitoramento da leira de compostagem.

Parâmetro	Metodologia
Preparo da amostra para análise - fertilizantes sólidos	A.1 - p.137
Determinação da umidade a 65 °C (U ₆₅)	D.1 - p.140
Determinação pH	D.2 - p.140
Nitrogênio total	E.11 - p.141
Fósforo total	E.2.3.2 - p.145
Potássio solúvel em água	E.6 - p.149
Cálcio e magnésio	E.7.2.1.3 - p.154
Enxofre	E.8.2.1.1 - p.157
Boro	E.9.2.2.1 - p.158
Micronutrientes (Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn)	Espectrometria de absorção atômica - p.160

Fonte: adaptado de MAPA (2017).

ser mantida, no interior da leira, em torno de 60%. Os resultados obtidos para a caracterização do teor de umidade do lodo bruto, do lodo desaguado e do material estruturante podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Teor de umidade.

Amostras	Teor umidade (%)
Lodo bruto	94,6
Lodo desaguado	69,6
Material estruturante (poda de árvore)	17,9

Vários fatores são importantes durante a compostagem, entre os quais merecem destaque a aeração, a temperatura, a umidade, a relação C/N, o pH, a estrutura e os fatores físico-químicos. Os dados obtidos no acompanhamento do processo de compostagem, sobre condições físico-químicas e nutrientes (% ao natural), estão apresentados em gráficos de dispersão, SigmaPlot, versão 12.5, representados nas Figuras 5 a 10 e na Tabela 4.

3.2. Características exigidas pela legislação para fertilizante composto Classe D

A utilização de biossólido proveniente de lodo de ETE para fins agrícolas deve atender às condições estabelecidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020, que estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, entre outros, dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes destinados

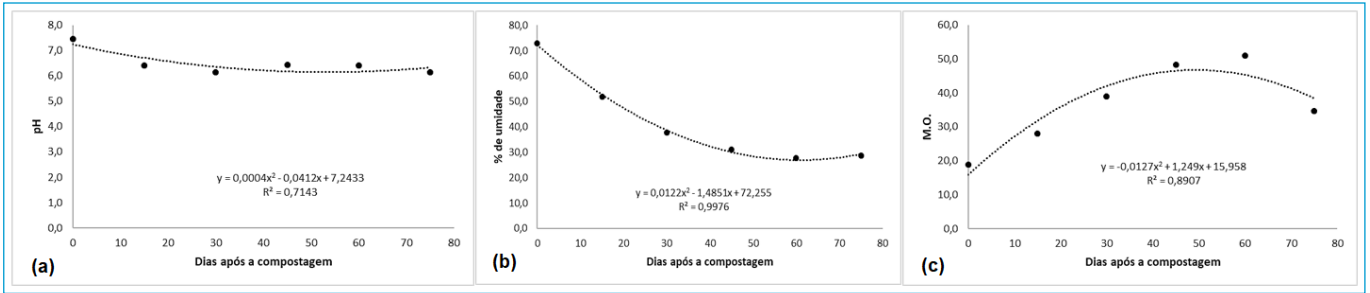


Figura 5 - (a) Potencial hidrogeniônico (pH), (b) teor umidade e (b) matéria orgânica (M.O.).

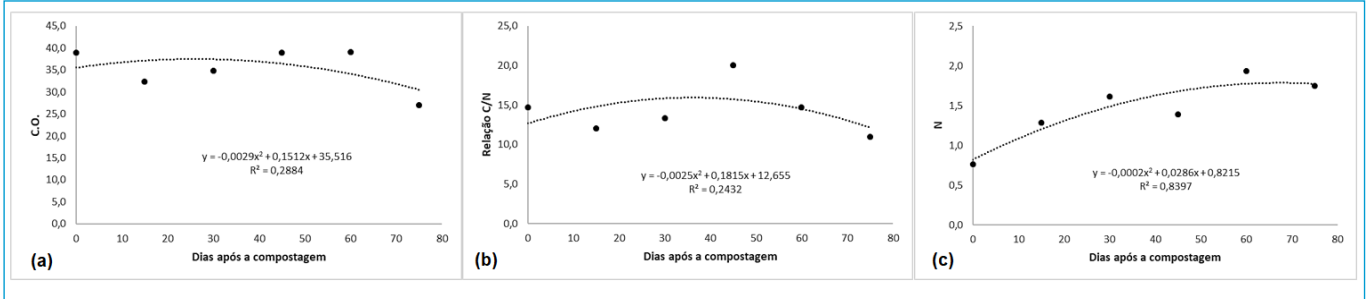


Figura 6 - (a) Carbono orgânico (C.O), (b) relação carbono/nitrogênio (C/N) e (c) nitrogênio (N).

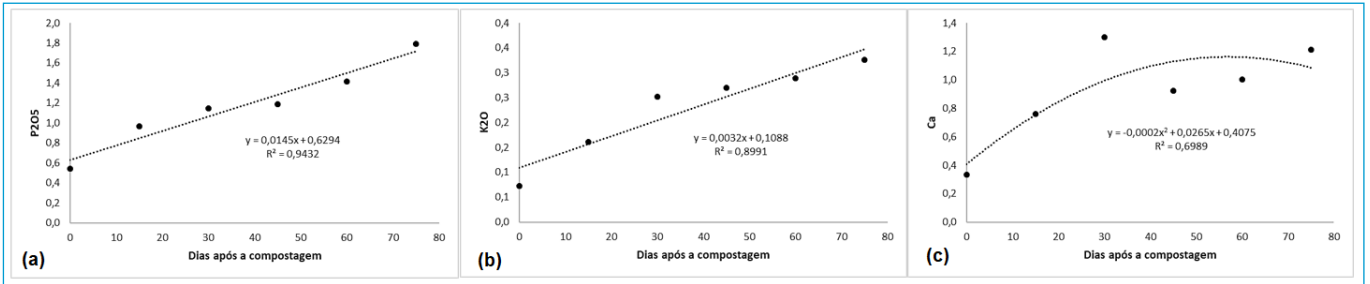


Figura 7 - (a) Fósforo (P₂O₅), (b) potássio (K₂O) e (c) cálcio (Ca).

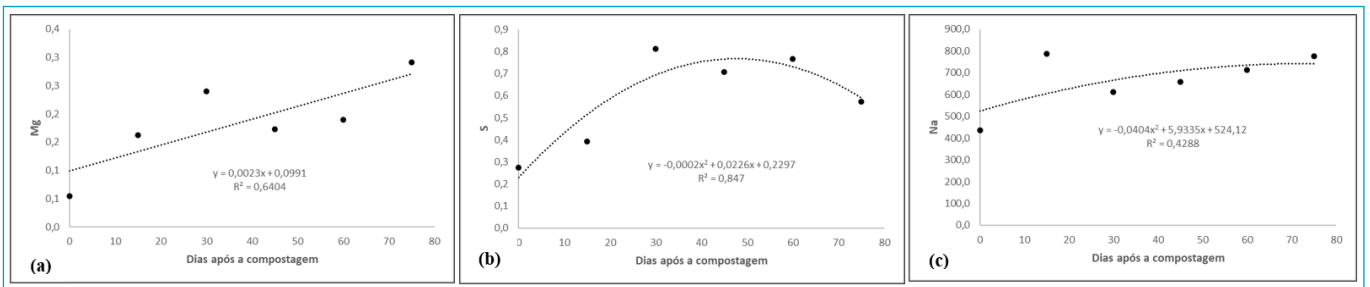


Figura 8 - (a) Magnésio (Mg), (b) enxofre (S) e (c) sódio (Na).

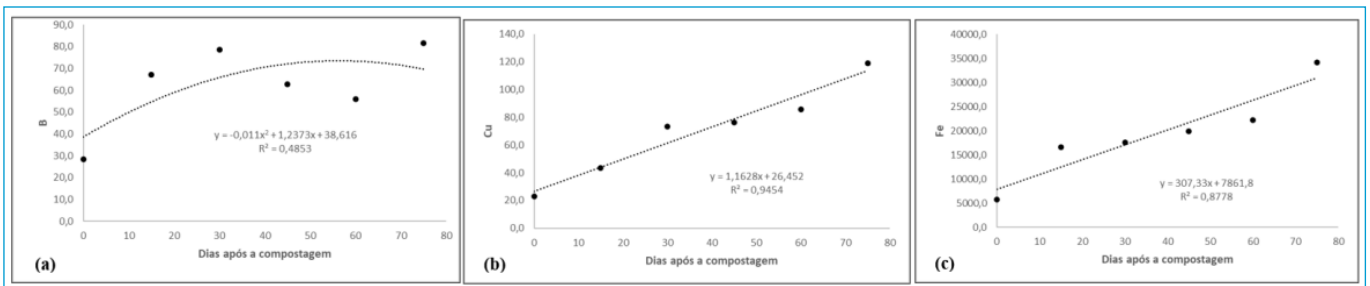


Figura 9 - Boro (B), cobre (Cu) e ferro (Fe).

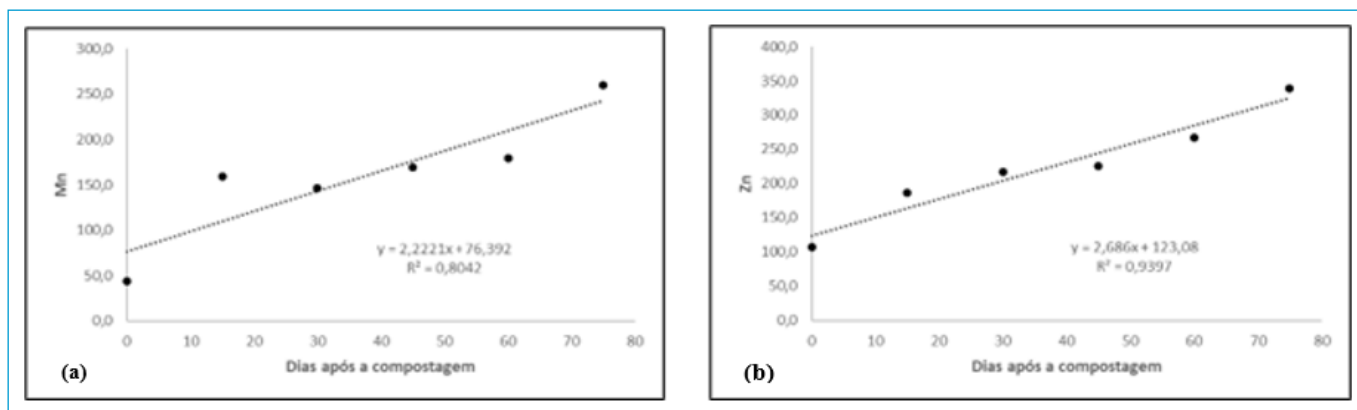


Figura 10 - Manganês (Mn) e zinco (Zn).

Tabela 4 - Propriedades físico-químicas e nutrientes referentes ao processo de compostagem.

AMOSTRA(S)		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Umidade	M.O.	C.O.	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Rel. C/N	pH
Amostras	Data	* % (ao natural)								seca	* mg/kg (ao natural)						ao natural	
	1	08/05/2019	0,76	0,54	0,07	0,33	0,05	0,27	72,93	18,95	38,89	436,65	28,33	22,73	5786,87	43,85	107,36	14,66/1
2	22/05/2019	1,29	0,96	0,16	0,76	0,16	0,39	51,86	28,08	32,41	786,32	67,00	43,33	16633,01	158,87	186,79	12,00/1	6,42
3	05/06/2019	1,62	1,15	0,25	1,30	0,24	0,81	37,76	38,98	34,81	609,90	78,67	73,47	17535,66	146,52	216,54	13,33/1	6,13
4	19/06/2019	1,39	1,18	0,27	0,92	0,17	0,71	31,01	48,28	38,89	657,64	62,69	76,32	19941,51	169,31	225,84	20,00/1	6,43
5	03/07/2019	1,94	1,41	0,29	1,00	0,19	0,77	27,64	50,91	39,07	713,39	55,89	85,60	22278,13	179,63	266,74	14,66/1	6,41
6	17/07/2017	1,75	1,79	0,33	1,21	0,29	0,57	28,62	34,73	27,04	775,43	81,67	118,90	34166,00	260,15	339,57	11,00/1	6,13

Fonte: autor. Dados gerados pela FCA-UNESP (2019).

à agricultura. Anteriormente, a Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009, estabelecia que os fertilizantes deveriam ser classificados de acordo com as matérias-primas utilizadas na sua produção, classificando como Classe “D” o fertilizante orgânico que, em sua produção, utilizasse qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários e resultasse em produto de utilização segura na agricultura. As propriedades físico-químicas, os nutrientes e os patógenos são apresentados em porcentagem mássica na Tabela 5.

A Tabela 6 apresenta as exigências para controle da temperatura e de patógenos de acordo com a Resolução CONAMA nº 481/2017 (BRASIL, 2017), vigente à época das avaliações, que estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos. Apresenta também os resultados obtidos para a amostra 6 (17 de julho de 2019), que corresponde ao final do processo de compostagem, indicando que o biossólido pode ser utilizado como fertilizante Classe D.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020, que define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, também são atendidas as exigências para fertilizante Classe B, conforme apresentado na Tabela 7. Os resultados também atendem aos limites estabelecidos pelo MAPA para agentes patogênicos.

3.3. Avaliação da temperatura e análise microbiológica, do processo de compostagem durante o período de ensaio

A Figura 11 apresenta o gráfico de dispersão obtido no acompanhamento da temperatura durante o processo de compostagem. A Tabela 6 apresenta os

resultados obtidos para controle de temperatura e avaliação da presença de patógenos, realizado mediante análise da amostra 6 (17 de julho de 2019), que configura o final do processo de compostagem.

Com base na Resolução CONAMA nº 498/2020, pode-se considerar que o biossólido produzido seria classificado como Classe B, pois atende à seguinte exigência para o processo de compostagem: a biomassa deve atingir uma temperatura mínima de 40 °C, durante, pelo menos, 5 dias, com a ocorrência de um pico de 55 °C, ao longo de 4 horas sucessivas nesse período.

A área demarcada na Figura 11 corresponde ao período em que a temperatura foi igual ou superior a 55 °C, indicando também o atendimento às exigências referentes à Resolução CONAMA nº 481/2017 (BRASIL, 2017), vigente à época do estudo.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho apontam que o processo de compostagem realizado com a utilização do lodo da ETE em estudo e o material estruturante (poda de árvore) atendem à legislação em relação aos padrões de valor agrônomico, apresentando potencial para o uso agrícola, e possibilitaram constatar a contribuição da metodologia para avaliar a eliminação de patógenos.

A utilização de lodo de esgotos como fertilizante pode reduzir até 60% do consumo de fertilizantes fosfatados, o que representa a importância de sua utilização.

A nova Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020) representa um avanço e o reconhecimento da importância dos biossólidos como

Tabela 5 – Características exigidas pela Legislação para fertilizante orgânico.

Parâmetros agrônômicos	Referência – fertilizante orgânico	
	MAPA IN nº 25 (2009) Classe “D”	MAPA IN nº 61 (2020) Classe “B”
Umidade máxima (%)	70	50
N total mínimo (%)	0,5	0,5
C orgânico mínimo (%)	15	15
pH mínimo	6	Conforme declarado
Relação C/N – máxima	20	20

Tabela 6 – Limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 481/2017 e resultados obtidos ao final do processo de compostagem.

Parâmetro	Exigência legal	Resultados - lodo compostado/biossólido
Temperatura	Mínimo > 55 °C por 14 dias ou > 65 °C por 3 dias	Manteve-se > 55 °C por, aproximadamente 30 dias
Agentes patogênicos*	Ovos viáveis de helmintos: 1,0 ovo/4,0 g de ST	0,64/4,0 g ST
	<i>Salmonella sp.</i> : ausência/10 g de matéria seca	Ausente

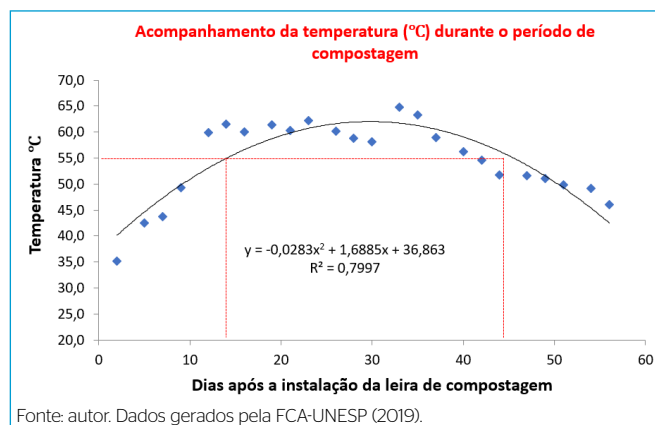
*Análise realizada pelo Instituto Agrônomo de Campinas sob o número: MS297/2019.
ST: sólidos totais.

Tabela 7 – Limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 498/2020 e resultados obtidos ao final do processo de compostagem.

Parâmetros agrônômicos	Fertilizante orgânico composto Classe B	Resultados lodo compostado/ biossólido
Umidade máxima (%)	70,0	29,1
N total mínimo (%)	0,5	1,75
C orgânico mínimo (%)	15	34,7
pH mínimo	6,0	6,1
Relação C/N – máxima	20	11,1/1

Fonte: autor. Dados gerados pela FCA-UNESP (2019).

fornecedores de matéria orgânica, macro e micronutrientes que exercem papel fundamental na produção agrícola e na manutenção da fertilidade do solo, estimulando essa importante alternativa para a destinação final dos lodos produzidos em estações de tratamento de esgotos sanitários (ETEs). Sua abordagem considera o potencial agrônômico; a redução de atratividade de vetores; as substâncias químicas; e a qualidade microbiológica,



Fonte: autor. Dados gerados pela FCA-UNESP (2019).

Figura 11 – O acompanhamento da temperatura, durante o processo de compostagem, foi realizado em °C (graus Celsius).

fundamentada em estudos de avaliação quantitativa de risco microbiológico, bem como no atendimento a parâmetros operacionais específicos baseados nos processos de produção do biossólido.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014, 444 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10.007. Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M.; AZEVEDO, J. C. R. Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 1, p. 43-53, 2016.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 704p.

GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA. Department of Water and Environmental Regulation. *Western Australian guidelines for biosolids management*. Joondalup: DWER, 2012.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. *Resolução nº 481*, de 03 de outubro de 2017. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Brasília: Conselho Nacional de Meio Ambiente, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. *Resolução nº 498*, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção

e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília: Conselho Nacional de Meio Ambiente, 2020.

CAMINADA, S. M. L. *Avaliação da presença de fármacos em biossólido compostado proveniente de Estação de Tratamento de Esgotos*. Tese (Doutorado em Ciências). Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

CARVALHO, P. C. T. Compostagem. In: TSUTIYA, M. T. *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: ABES, 2002, p. 181-208.

CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATO, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Science & Technology*, v. 73, n. 3, p. 453-462, 2016.

COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. *Uso agrícola de lodo de esgoto: Avaliação após a Resolução nº 375 do CONAMA*. Botucatu: FEPAF, 2010, 407p.

COUNCIL DIRECTIVE. Council Directive 86/278/EEC on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. *Official Journal*, v. 181, p. 6-12, 1986.

GUIMARÃES, J. C. S.; CORDEIRO, J.; VITORINO, D. C. F. R. Use of sewage sludge in agriculture: a scientometric analysis. *Research, Society and Development*, v. 7, n. 9, p. e479391, 2018.

HUDCOVÁ, H.; VYMAZAL, J.; ROZKOŠNÝ, M. Present restrictions of sewage sludge application in agriculture within the European Union. *Soil & Water Resources*, v. 14, n. 2, p. 104-120, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA VEGETAL (LANARV). *Manual de Análise de Corretivos Fertilizantes e Inoculantes: Métodos Oficiais*. Brasília: LANARV, 1988.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Instrução Normativa nº 25*, de 23 de julho de 2009. Aprova as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília: MAPA, 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Manual de métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos*. Brasília: MAPA, 2017.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Instrução Normativa nº 61*, de 08 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Brasília: MAPA, 2020.

MOTA, S. *Introdução à engenharia ambiental*. 4 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

NUVOLARI, A. *Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola*. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

SAITO, M. L. *O uso do lodo de esgoto na agricultura: precauções com os contaminantes orgânicos*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007, 35 p.

TSUTIYA, M. T.; CAMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. *Biossólidos na agricultura*. 2 ed. São Paulo: ABES, 2002. 468 p.