

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

USO POTENCIAL DO LODO SECUNDÁRIO GERADO EM UMA INDÚSTRIA DE
COMPÓSITOS EM CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

ANA LARISSA PEREIRA MIRANDA CORREIA

Prof Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro - SP
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ANA LARISSA PEREIRA MIRANDA CORREIA

USO POTENCIAL DO LODO SECUNDÁRIO GERADO EM
UMA INDÚSTRIA DE COMPÓSITOS EM CULTURA DE
CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP
2024

C824u	Correia, Ana Larissa Pereira Miranda Uso potencial do lodo secundário gerado em uma indústria de compósitos em cultura de cana-de-açúcar / Ana Larissa Pereira Miranda Correia. -- Rio Claro, 2024 85 p. : il., tabs., fotos, mapas Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro 1. Lodo. 2. Resíduos orgânicos como fertilizantes. 3. Cana-de-açúcar. 4. Economia circular. 5. Viabilidade econômica. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ANA LARISSA PEREIRA MIRANDA CORREIA

USO POTENCIAL DO LODO SECUNDÁRIO GERADO EM
UMA INDÚSTRIA DE COMPÓSITOS EM CULTURA DE
CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro (orientador)

Prof Dra. Vania Silvia Rosolen

Dra. Sandra Imaculada Maintinguer

Rio Claro, 27 de junho de 2024.



Assinatura da aluna



Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me conduzir nesta jornada extraordinária e por sempre confortar meu coração.

Agradeço ao meu pai, Edilson Miranda Correia, por todo apoio, carinho, conselhos e amor incondicional. A confiança que depositou em mim até mesmo quando eu duvidava, foi essencial para conquistar o nosso sonho.

Agradeço também a minha família, por terem colaborado na minha criação, acreditado no meu potencial e apoiado essa fase tão importante na minha vida.

Agradeço ao meu professor e orientador, Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro, pela confiança, pelo suporte dado e por todo conhecimento compartilhado.

Agradeço também a professora Dra. Vânia Silvia Rosolem e ao professor Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro, pelo comprometimento e dedicação ao curso de Engenharia Ambiental da UNESP Rio Claro.

Agradeço, de modo geral, à UNESP, a todos os professores que contribuíram para minha formação e aos demais colaboradores da universidade.

Agradeço aos meus colegas de classe, as minhas amigas de república e a todos os amigos que fiz ao longo desses anos, por terem suavizado momentos difíceis e por terem criado lembranças tão valiosas.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, por confiarem em meu potencial, conhecimento e por apoiarem a realização deste estudo. A oportunidade que me deram de ingressar na área ambiental reafirmou minha convicção de que escolhi a profissão certa.

Por fim, agradeço a todos aqueles que estiveram presentes na minha vida e me incentivaram a entrar nesta jornada e concluí-la com sucesso. As palavras de encorajamento foram fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

O lodo destaca-se como o principal resíduo produzido em uma estação de tratamento de águas residuárias. Atualmente, sua disposição mais comum é o aterro sanitário, porém existem alternativas ambientalmente mais adequadas sendo desenvolvidas, como a aplicação no solo como condicionador e fertilizante. O presente trabalho visa investigar a viabilidade técnica e econômica para a aplicação do lodo secundário, gerado em uma estação de tratamento de águas residuárias de uma indústria de compósitos, na agricultura. Para isso, foram realizadas as seguintes etapas: coleta e caracterização do lodo primário e secundário; seleção de duas áreas agrícolas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar; caracterização dos solos dessas áreas; elaboração de um plano de aplicação do biossólido nas áreas selecionadas; e análise da viabilidade econômica comparativa com fertilizantes minerais. A caracterização do lodo primário confirmou que o material não era perigoso segundo as normativas vigentes. O lodo secundário, após caracterização, demonstrou estar dentro dos limites máximos permitidos, sendo denominado no trabalho como biossólido. A análise dos solos revelou que o primeiro solo selecionado já tinha quantidades adequadas de potássio e micronutrientes, devido à intervenção anterior com vinhaça, o que limitou a aplicação do biossólido. O segundo solo apresentou quantidades razoáveis de nutrientes e avançou para o plano de aplicação. Para uma produtividade esperada de mais de 170 t/ha de cana-de-açúcar, definiu-se uma taxa de aplicação de 8,89 t/ha de biossólido. Além disso, verificou-se que o biossólido adicionaria quantidades de potenciais contaminantes muito inferiores aos limites permitidos pelas normativas. Através da comparação entre os solos, concluiu-se que o biossólido é recomendado para o solo que não tenha passado por processos de adubação. Por fim, na análise da viabilidade econômica, constatou-se que o custo atual da disposição do biossólido em aterro sanitário é equivalente ao custo de transporte por até 134 km. Além disso, foi verificado que utilizando o biossólido como adubo em vez de fertilizantes minerais, o proprietário da área agrícola poderá economizar até 58% por hectare. Assim, este estudo contribui para a avaliação prática e econômica da aplicação de biossólido na agricultura, demonstrando seu potencial como alternativa sustentável para o manejo de lodos industriais.

Palavras-chave: Lodo, Resíduos orgânicos como fertilizantes, Cana-de-açúcar, Economia circular, Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Sludge stands out as the main waste produced in a wastewater treatment plant. Currently, its most common disposal is landfill, but there are more environmentally appropriate alternatives being developed, such as application to the soil as a conditioner and fertilizer. The present work aims to investigate the technical and economic feasibility for the application of secondary sludge, generated in a wastewater treatment plant from a composites industry, in agriculture. To achieve this, the following steps were carried out: collection and characterization of primary and secondary sludge; selection of two agricultural areas destined to the cultivation of sugar cane; characterization of the soils in these areas; preparation of a biosolid application plan in the selected areas; and analysis of comparative economic viability with mineral fertilizers. The characterization of the primary sludge confirmed that the material was not dangerous according to current regulations. The secondary sludge, after characterization, proved to be within the maximum permitted limits, being referred to in the work as biosolids. Soil analysis revealed that the first soil selected already had adequate amounts of potassium and micronutrients, due to previous intervention with vinasse, which limited the application of biosolids. The second soil presented reasonable amounts of nutrients and advanced to the application plan. For an expected productivity of more than 170 t/ha of sugarcane, an application rate of 8.89 t/ha of biosolids was defined. Furthermore, it was found that the biosolids would add amounts of potential contaminants much lower than the limits allowed by regulations. Through comparison between soils, it was concluded that biosolids is recommended for soil that has not undergone fertilization processes. Finally, in the analysis of economic viability, it was found that the current cost of disposing of biosolids in a landfill is equivalent to the cost of transporting it for up to 134 km. Furthermore, it was found that using biosolids as fertilizer instead of mineral fertilizers, the owner of the agricultural area can save up to 58% per hectare. Thus, this study contributes to the practical and economic evaluation of the application of biosolids in agriculture, demonstrating its potential as a sustainable alternative for the management of industrial sludge.

Keywords: Sludge, Organic waste such as fertilizers, Sugar cane, Circular economy, Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de tratamento por lodos ativados convencional e pontos de geração de subprodutos.....	14
Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação da fibra de vidro da Fábrica.....	28
Figura 3 – Município de Rio Claro, São Paulo.....	29
Figura 4 – Localização dos municípios das áreas agrícolas, com a delimitação de Engenheiro Coelho/SP (linha verde), delimitação de Capivari/SP (linha azul) e a delimitação de Rio Claro/SP (linha amarela).....	31
Figura 5 – Fluxograma da geração do efluente e seu destino.....	32
Figura 6 – Diagrama do sistema de tratamento de águas residuárias (STAR) da Fábrica	34
Figura 7 – Leito de secagem do lodo secundário	35
Figura 8 - Coleta do lodo secundário no leito de secagem para análise	36
Figura 9 - Amostras do lodo secundário para análise	37
Figura 10 - Amostras do lodo secundário para análise	38
Figura 11 - Fluxograma do plano de aplicação do lodo na agricultura	48
Figura 12 - Distância limite para o transporte do biossólido, com a delimitação do raio, a delimitação de Engenheiro Coelho/SP (linha verde), a delimitação de Capivari/SP (linha azul), a delimitação de Rio Claro/SP (linha amarela) e a localização da Fábrica (ponto vermelho)	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das análises para caracterização do lodo I e lodo II.....	15
Tabela 2 - Resultados da caracterização do lodo têxtil	16
Tabela 3 - Resultados da caracterização do solo antes e depois da aplicação do lodo	22
Tabela 4 - Absorção de metais pesados por planta cultivada em solo normal e em solo corrigido com lodo	22
Tabela 5 - Comparação entre o Solo Natural e de solo com lodo	23
Tabela 6 - Limites máximos para teores de substâncias inorgânicas no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	25
Tabela 7 - Limites máximos para Escherichia Coli e Organismos patogênicos no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	25
Tabela 8 - Valores máximos admitidos no lodo, determinado pela Instrução Normativa nº27/2006 do MAPA.....	26
Tabela 9 - Valores orientadores para solo, determinado pela Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E da CETESB.....	40
Tabela 10 - Limites máximos para teores de substâncias inorgânicas no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	41
Tabela 11 - Limites máximos para Escherichia Coli e Organismos patogênicos no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	42
Tabela 12 - Limites máximos para contaminantes no lodo, determinado pela Instrução Normativa nº27/2006 do MAPA.....	43
Tabela 13 - Quantidades indicadas de nitrogênio, fósforo, potássio, boro, cobre, manganês e zinco para aplicar na cana-de-açúcar, segundo Boletim 100 do IAC ...	44
Tabela 14 - Valor máximo admissível de substâncias químicas de interesse no solo pela aplicação do lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	45
Tabela 15 - Caracterização do lodo primário e Valores Máximos Permitidos, segundo o anexo F da ABNT NBR 10004:2004	52
Tabela 16 - Caracterização do lodo secundário e Valores Máximos Permitidos, determinados pela CETESB P4.230/2021 e pelo MAPA IN 27/2006	54

Tabela 17 - Caracterização do Solo Teste 1 e Valor de Prevenção, determinado pela Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E da CETESB	57
Tabela 18 - Caracterização do Solo Teste 2 e Valor de Prevenção, determinado pela Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E da CETESB	59
Tabela 19 - Composição química média da vinhaça proveniente da produção do álcool a partir do melaço, do caldo de cana e do misto	61
Tabela 20 - Taxa de aplicação do biossólido para o Solo Teste 1, determinada segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	62
Tabela 21 - Taxa de aplicação do biossólido para o Solo Teste 2, determinada segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	63
Tabela 22 - Teor de referência das substâncias químicas de interesse no solo e valores máximos de aporte, determinado segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	65
Tabela 23 - Valor do aporte teórico e valor de aporte possível para cada uma das substâncias de interesse, determinado segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB	66
Tabela 24 - Custos associados ao descarte do lodo em aterro sanitário	67
Tabela 25 - Preço dos fertilizantes NPK e quantidade recomendada para a cultura de cana-de-açúcar, segundo Boletim Técnico 100 do IAC	68
Tabela 26 - Preço dos fertilizantes NPK por hectare cultivado com cana-de-açúcar	68
Tabela 27 - Quantidade em porcentagem que a menor taxa de aplicação do biossólido pode suprir das taxas de aplicação do biossólido calculadas para os NPK	70
Tabela 28 - Quantidade que o biossólido pode suprir de nutrientes e economia gerada ao optar por utilizá-lo como fertilizante	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Sistema de tratamento de efluentes de esgoto e industriais	13
3.2	Caracterização do lodo	14
3.3	Impactos causados pelo lodo.....	17
3.4	Métodos de tratamento de lodo	18
3.5	Alternativas para destinação final de lodo.....	20
3.6	Uso do lodo como fertilizante e condicionador de solo	21
3.7	Fibra de vidro em compósitos: Características e aplicações diversas	26
3.8	Produção da fibra de vidro	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Local da pesquisa	29
4.1.1	Área industrial	29
4.1.2	Área agrícola	29
4.2	Origem do lodo	31
4.3	Caracterização do sistema de tratamento de águas residuárias e processos de tratamento do lodo	32
4.4	Caracterização do lodo	35
4.5	Seleção da área e caracterização do solo	38
4.6	Parâmetros para utilização do lodo na agricultura	41
4.7	Plano de aplicação do lodo na agricultura	43
4.8	Viabilidade econômica	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Características do lodo	52
5.2	Características do Solo Teste 1 e do Solo Teste 2	57
5.3	Plano de aplicação do lodo na agricultura	62
5.4	Viabilidade econômica	66
6	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS.....	73
	ANEXOS	81

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação e a regulamentação sobre a preservação do meio ambiente, têm feito com que muitas empresas repensem os seus métodos para a disposição final dos seus resíduos sólidos. Isso inclui os resíduos gerados pelas estações de tratamentos de águas residuárias.

O lodo destaca-se como o principal resíduo produzido em uma estação de tratamento de águas residuárias. Devido ao seu elevado volume e à sua composição variável, resultante da ampla diversidade de processos produtivos e insumos utilizados, seu tratamento e a disposição final são complexos (Andreoli; von Sperling, 2001).

Atualmente a disposição final mais empregada para o lodo industrial é o aterro sanitário, porém, apesar de ser uma alternativa legal e de baixo custo, esta solução traz diversos impactos ambientais, além de inviabilizar o reaproveitamento de nutrientes e material orgânico presente no lodo, e reduzir a vida útil do aterro sanitário.

Ao mesmo tempo, existem alternativas ambientalmente mais adequadas sendo desenvolvidas visando o tratamento e a reciclagem do lodo, como a aplicação no solo como condicionador e fertilizante, o aproveitamento energético e o insumo para materiais utilizados na construção civil. Dentre as alternativas para disposição final do lodo, a com fins agrícola e florestal apresenta-se como uma das mais utilizadas (Bettiol; Camargo, 2006). Segundo Abreu *et al.* (2017) o lodo constitui uma fonte de matéria orgânica e de nutrientes, que após ser devidamente tratado e estabilizado possibilita a melhoria das propriedades físicas e químicas do solo favorecendo o crescimento das plantas.

Embora a utilização agrícola de lodo de esgoto tenha surgido como uma alternativa prática e econômica para o tratamento destes resíduos, a presença de metais pesados representa uma séria ameaça ao meio ambiente. A aplicação desse lodo carrega consigo o risco de desequilíbrios nutricionais, bem como o acúmulo e a lixiviação de elementos tóxicos. A transferência de metais do lodo para o solo, seguida pela contaminação de águas subterrâneas e plantas, apresenta riscos potenciais para a saúde humana e ambiental (Mahapatra *et al.*, 2013)

Se tratando de metais pesados, sua acumulação no solo pode resultar na deterioração de suas funções e resultar na transferência de metais pesados para a cadeia alimentar humana, através da absorção por culturas agrícolas ou pelo pastoreio de gado (Mahapatra *et al.*, 2013).

A presença de substâncias tóxicas no lodo industrial também é preocupante, pois estas substâncias são potencialmente perigosas para humanos e animais por lixiviar para águas subterrâneas, e causar degradação química e biológica (Saito, 2007).

Mesmo diante dos desafios, diversas pesquisas apoiam estas alternativas e buscam encontrar uma forma segura de aplicá-las, conforme apresentado na revisão bibliográfica na seção 3.6 Uso do lodo como fertilizante e condicionador de solo.

Além disso, deve-se destacar a vocação agrícola do Brasil. Em 2021, foi o maior exportador mundial de soja (91 milhões de toneladas), terceiro maior produtor de milho e feijão (105 milhões e 2,9 milhões de toneladas, respectivamente), é líder mundial na produção de cana-de-açúcar (Embrapa, 2022), e em 2023 se tornou o maior exportador de milho do mundo (g1, 2023). Para manter esta elevada produção, demanda quantidade expressivas de fertilizantes, ocupando o lugar de 4º maior consumidor mundial. Apenas em 2021, o Brasil importou 85% dos fertilizantes aplicados na agricultura (BRASIL, 2022).

A aplicação regular desta técnica tornará o Brasil menos dependente de insumos estrangeiros, o que irá beneficiar tanto a economia do país quanto o meio ambiente, reduzindo os impactos ambientais causados pela disposição destes resíduos em aterros, e incentivando a economia circular.

Portanto, com a finalidade de contribuir com as pesquisas sobre utilização do lodo industrial como fertilizante e reduzir o envio desse resíduo para os aterros sanitários, o presente trabalho visa investigar a viabilidade técnica e econômica para a aplicação do lodo secundário, gerado em uma estação de tratamento de águas residuárias de uma indústria de compósitos, na agricultura.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar os potenciais usos no solo do lodo secundário gerado em uma estação de tratamento de efluentes gerados em uma indústria de compósitos.

2.1 Objetivos específicos

- Avaliar a viabilidade técnica de aplicação do lodo secundário em um solo da região de Rio Claro/SP, tomando por base a CONAMA Nº 498/2020, a CETESB P4.230/2021 e a MAPA IN Nº 27/2006.

- Investigar a viabilidade econômica para a aplicação do lodo na área selecionada.

Espera-se, ao fim da pesquisa, encontrar soluções ambientalmente adequadas e economicamente viáveis para o lodo secundário gerado em estação de tratamento de efluentes gerados em uma indústria de compósitos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema de tratamento de efluentes de esgoto e industriais

O tratamento de esgoto é a remoção de constituintes indesejáveis para que o efluente tratado possa retornar ao meio ambiente ou ser reutilizado e, em geral, a complexidade do diagrama do processo de tratamento dependerá de quais constituintes deverão ser removidos e dos níveis de remoção requeridos de acordo com a finalidade do tratamento (Metcalf; Eddy, 2016). Isso quer dizer que o sistema de tratamento de esgoto não é único e que, na verdade, é o agrupamento de diversos processos para alcançar um determinado objetivo de tratamento.

Apesar disto, como os efluentes de carga doméstica são gerados pelos mesmos constituintes, possuem um sistema de tratamento em comum que também é utilizado como base para o tratamento de efluentes industriais. Esse sistema é formado pelas seguintes etapas de tratamento: preliminar, primário, secundário e terciário.

- O nível preliminar se trata da remoção de constituintes grosseiros, como trapos, galhos, flotáveis, areia e graxa, e para isso pode incluir as operações de gradeamento e tanque de remoção de areia.
- O nível primário visa a remoção de parte de sólidos suspensos e matéria orgânica do esgoto e é geralmente efetuado pela adição de compostos químicos, podem compor nesta etapa os processos filtração, sedimentação e flotação.
- O nível secundário tem como objetivo a remoção de toda a matéria orgânica biodegradável e dos sólidos suspensos, e normalmente é realizado por processos biológicos chamados de lodo ativado.
- O nível terciário visa a remoção de sólidos suspensos residuais, a desinfecção, a remoção de nutrientes. Esse tratamento é feito usualmente por filtros, processos biológicos complementares e adição de produtos químicos.

Fonte: (Richter, 2001; Metcalf; Eddy, 2016).

De forma geral, o tratamento de efluentes industriais utiliza as mesmas etapas do tratamento de esgoto. Porém devido a sua variedade de substâncias cabe a cada indústria, de acordo com as características de seu efluente e do objetivo de tratamento, aplicar os processos adequados e montar o seu próprio sistema de tratamento (Richter, 2001).

3.2 Caracterização do lodo

O termo “lodo” tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos gerados no tratamento de efluentes. Composto por materiais sedimentados e de sólidos gerados durante o tratamento, e aproximadamente 95% de água.

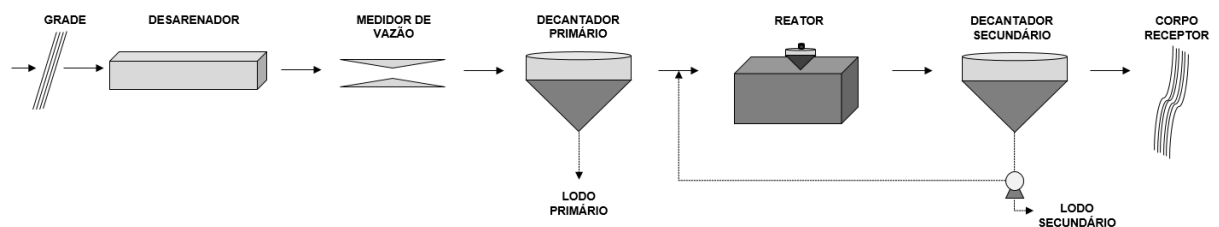
A produção de lodo é inerente ao tratamento de efluentes e podem existir até 3 tipos: lodo primário, lodo secundário e lodo químico.

- O lodo primário é gerado na etapa do tratamento primário. Ele é constituído pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto, tem cor geralmente cinza, possui material putrescível e pode exalar um odor desagradável.
- O lodo secundário, também chamado de lodo biológico, é gerado no nível secundário do tratamento. Ele é a biomassa de microrganismos gerada na remoção da matéria orgânica do efluente. Geralmente apresenta um aspecto floculento e coloração marrom.
- O lodo químico é gerado em sistemas de tratamento que possuem a etapa físico-química. Ele é resultante da precipitação química com sais metálicos ou com cal. Geralmente apresenta uma coloração escura, possui um odor menos desagradável que o do lodo primário e é um pouco pegajoso.

FONTE: (von Sperling; Gonçalves, 2001; Metcalf; Eddy, 2016)

A Figura 1 apresenta as etapas de tratamento de efluentes e os pontos de geração de lodo.

Figura 1 - Sistema de tratamento por lodos ativados convencional e pontos de geração de subprodutos



Fonte: von Sperling; Gonçalves (2001)

As características do lodo dependem das características do efluente e do tipo de tratamento aplicado, esta é uma caracterização prévia para selecionar alternativas de destinação final.

Na caracterização do lodo industrial é importante analisar os aspectos de biodegradabilidade; matéria orgânica; nutrientes; e toxicidade. (von Sperling, 2001)

Fagnani *et al.* (2019) realizou a caracterização de lodo industrial gerado no tratamento físico-químico de efluentes do abate e processamento de aves para analisar o aproveitamento energético. Em sua caracterização foram realizadas análises de classificação dos resíduos conforme a ABNT NBR 10.004: 2004 - Massa bruta (ABNT, 2004), NBR 10.005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos e Orgânicos (ABNT, 2004) e NBR 10.006:2004 - Extrato Solubilizado (ABNT, 2004). Na Tabela 1 apresentam-se os resultados das análises realizadas por Fagnani.

Tabela 1 - Resultados das análises para caracterização do lodo I e lodo II

Parâmetro	Unidade	Lodo I	Lodo II
Umidade	%	62,5	59,4
Material Volátil	%	82,35	84,58
Cinzas (base seca)	%	9,01	4,24
Carbono Fixo	%	8,61	11,17
Carbono	%	20,6	23,2
Hidrogênio	%	9,48	9,67
Nitrogênio	%	2,48	2,79
Enxofre	mg/kg	4785,2	6255,5
Arsênio	mg/kg	6,7	< 0,4902
Cádmio	mg/kg	7,18	< 0,245
Cobalto	mg/kg	17,6	< 0,4902
Chumbo	mg/kg	2,15	< 0,4902
Mercúrio	mg/kg	< 0,001	< 0,001
Níquel	mg/kg	11,19	7,05
Selênio	mg/kg	< 0,4902	< 0,4902
Telúrio	mg/kg	< 2,5	< 2,5
Tálio	mg/kg	< 0,4902	< 0,4902
pH	-	5,69	6,23
Porcentagem de Sólidos	%	38,4	40,4
Sulfeto	mg/kg	< 1	< 1
Cianeto	mg/kg	0,2	0,1

Fonte: Fagnani *et al.* (2019).

Com base nos resultados, o lodo I e II foram classificados como CLASSE II A - Não perigoso, não inerte. Desta forma após a combustão em caldeira, as cinzas geradas podem ser reutilizadas para diversos fins. (Fagnani *et al.*, 2019)

Tank *et al.* (2022) também analisou um lodo industrial, porém gerado em uma indústria têxtil, por meio de ensaios de caracterização físico-químicas. A caracterização e classificação foram realizadas conforme a ABNT NBR 10.004: 2004 - Massa bruta (ABNT, 2004), NBR 10.005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos e Orgânicos (ABNT, 2004) e NBR 10.006:2004 - Extrato Solubilizado (ABNT, 2004). Com os resultados obtidos foi possível compreender o risco ambiental do resíduo e enquadrá-lo conforme a Norma da ABNT NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004). Os resultados da caracterização do resíduo têxtil encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da caracterização do lodo têxtil

Parâmetro	Unidade	Resultados
Reatividade	-	Ausência
Umidade	%	65,4
Corrosividade	-	8,7
Óleos e graxas	mg/kg	943,3
pH	-	8,62
Oxigênio Dissolvido	mg/L	5,24
Condutividade	$\mu\text{S}/\text{cm}$	2479
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	22,8
Salinidade	%	1,25
Cromo	mg/L	0,00861
Alumínio	mg/L	0,0313
Bário	mg/L	0,246
Sulfato	mg/L	280
Cloreto	mg/L	460,85

Fonte: Tank *et al.* (2022).

O lodo têxtil não atingiu o valor máximo permitido (VMP) para nenhum ensaio de acordo com a ABNT NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004). No entanto, os resultados do ensaio de solubilização indicaram quantidades acima do VMP para o parâmetro Sulfato (SO_4^{2-}), registrando 280mg/L da substância na solução, enquanto seu VMP era de 250mg/L. Portanto, essa constatação levou à classificação do lodo como um resíduo Classe II A, caracterizado como não perigoso, porém não inerte. Isso significa que embora o resíduo não apresente periculosidade, pode possuir propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água (Tank *et al.*, 2022).

3.3 Impactos causados pelo lodo

O lodo engloba uma variedade de toxinas, tanto biológicas quanto químicas, que incluem metais pesados, patógenos, compostos orgânicos não biodegradáveis e hidrocarbonetos clorados (Ansari *et al.*, 2022).

A presença de metais pesados só leva à formação de compostos pouco solúveis ao interagirem com seus constituintes. Determinados cátions, como o cádmio, são lixiviados, contaminando as águas subterrâneas. Essas águas, liberadas pelas plantas, introduzem os metais pesados na cadeia. O acúmulo contínuo desses metais resulta na contaminação tanto do solo quanto dos corpos d'água. O risco de biomagnificação desses metais na cadeia alimentar está intimamente ligado às propriedades do elemento, suas formas e sua camada com o sedimento alimentar (Haris *et al.*, 2020; Siddiqua *et al.*, 2021 *apud* Ansari *et al.*, 2022).

O contato do lodo com a água superficial também acarreta impactos significativos. O excesso de nutrientes introduzidos na água, como nitrogênio e fósforo, estimula um crescimento desproporcional de plantas aquáticas, juntamente com uma proliferação massiva de algas. A elevada carga de matéria orgânica é decomposta por bactérias presentes, as quais consomem o oxigênio dissolvido nos corpos d'água. Esse processo pode resultar em asfixia para os animais aquáticos, devido à diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido, podendo, em última instância, levar à morte desses animais (Murphy, 2002 *apud* Tiwari; Pal, 2022).

A presença de bactérias em uma água eutrófica, caracterizada por um alto teor de nutrientes, pode representar um risco para seres humanos e animais domésticos caso entrem em contato com essa água contaminada. As populações bacterianas presentes nesse ambiente podem produzir diversas toxinas, as quais também podem ser assimiladas por organismos aquáticos, peixes e outros animais que fazem parte da cadeia alimentar. Esse cenário aumenta a possibilidade de doenças e até mesmo a ocorrência de mortes em seres humanos (Tiwari; Pal, 2022). O mesmo ocorre com os animais e seres humanos que consumirem as plantas que foram infectadas através da disposição do lodo no solo sem tratamento.

Além disso, os metais pesados encontrados no lodo podem impactar na fertilidade e atividade microbiana no solo, como mostrou Ansari *et al.* (2022). O cromo (Cr) causa danos à membrana e à raiz, reduz a produção agrícola e as atividades enzimáticas; o cádmio (Cd) reduz a resistência das plantas às infecções fúngicas, diminuindo o desenvolvimento das plantas, deforma a função das enzimas e a

germinação das sementes; e o chumbo (Pb) afeta a germinação das sementes, diminui o desenvolvimento da biomassa, impede o desenvolvimento das raízes e reduz a produção de clorofila.

Por isso a necessidade de uma caracterização detalhada do resíduo a ser disposto no solo ou utilizado como fertilizante.

3.4 Métodos de tratamento de lodo

O tratamento de lodo refere-se ao conjunto de processos e técnicas aplicados para modificar as características físicas, químicas e biológicas do lodo resultante do tratamento de águas residuais ou de processos industriais. O objetivo é estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo para reduzir a concentração de patógenos e recuperar nutrientes valiosos quando possível (Von Sperling, 2014).

A estabilização do lodo geralmente ocorre em duas etapas: inicialmente, há o processo de espessamento do lodo, que ocorre pela desidratação do resíduo, seguido pela etapa de estabilização. Durante a fase de espessamento, aumenta-se a concentração de sólidos totais em aproximadamente 3%, utilizando diversas técnicas, tais como filtração, adensamento, flotação e centrifugação. Estas técnicas podem ser separadas em adensamento e deságue. O adensamento consiste na separação primária dos sólidos, semelhante à sedimentação, enquanto o deságue consiste em técnicas para aumentar a concentração dos sólidos após o adensamento.

- **Adensamento:** O adensamento consiste no aumento da concentração de sólidos nele contidos, através da remoção parcial da quantidade de água que caracteriza o seu grau de umidade. Os principais processos utilizados para o adensamento do lodo são: adensador por gravidade, adensador por flotação, adensador por centrifugação e adensador de esteiras (Jordão; Pessoa, 2009). As concentrações médias de sólidos totais variaram entre 3,86 e 4,87% em um estudo (Batista, 2015) e de acordo com Metcalf e Eddy (2016), pode atingir valores entre 3 e 6%.

- **Filtração:** A filtração é uma técnica utilizada para desidratar o lodo, removendo a água do material e reduzindo seu volume. Esse processo envolve a passagem do lodo através de um meio poroso, geralmente um filtro, onde a água é separada do sólido. Os tipos de filtro são: filtro prensa e filtro de esteira. É comum obter-se com filtro prensa uma torta de lodo com teor de sólidos da ordem de 35%, 65% de umidade,

podendo apresentar faixa típica entre 30 e 50% de teor de sólidos (Jordão; Pessoa, 2009).

- **Centrifugação:** É o processo de separação sólido/líquido forçada pela ação de uma força centrífuga. Os resultados esperados para remoção de umidade para estes equipamentos, da ordem de 25% de sólidos totais, mencionados pelos fabricantes, dificilmente são alcançados, normalmente estão entre 17 e 22% de sólidos totais (Batista, 2015).

- **Leitos de secagem:** O leito de secagem é um método natural de desidratação do lodo que consiste em colocá-lo em um tanque a céu aberto, onde ocorre a decantação, a percolação e a evaporação. A redução da umidade dependerá do tempo de desidratação e do clima. Em um estudo com leito de secagem por um período de 28 dias, os teores finais de sólidos totais variaram entre 39,46 e 41,99% (Ferreira, 2001).

Das tecnologias de tratamento de lodo para estabilização do resíduo se destacam: digestão anaeróbia e aeróbia, alcalinização, compostagem, secagem térmica e incineração.

- **Digestão anaeróbia:** A digestão anaeróbia é uma abordagem utilizada para a decomposição e estabilização de material orgânico e inorgânico no lodo, ocorrendo na ausência de oxigênio molecular. Essa prática visa a produção de biogás, principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), reduzindo substancialmente a matéria seca, patógenos e odores desagradáveis (Metcalf; Eddy, 2016; Hanum *et al.*, 2019). Estudos realizados mostraram que este método elimina cerca de 40% a 50% de sólido voláteis e de 66% a 86% de sólidos suspensos (Salsabil *et al.*, 2010) e 20% do peso do lodo em um período de 6 dias (Kurahashi *et al.*, 2017).

- **Digestão aeróbia:** O método de digestão aeróbia de lodo, realizado com a presença de aeração, envolve a oxidação de materiais orgânicos por microrganismos em um ambiente rico em oxigênio, gerando dióxido de carbono, água e compostos celulares (Tiwari; Awasthi, 2022). No estudo realizado por Salsabil *et al.* (2010) ele relatou que a digestão aeróbia removeu entre 57 e 71% de sólidos suspensos e, de acordo com Poulsen e Bester (2010), reduziu entre 30 e 90% a massa de 12 poluentes orgânicos.

- **Alcalinização:** As principais funções da estabilização com cal são a redução do conteúdo microbiano do lodo e a redução da disponibilidade de metais pesados. A

adição de cal não provoca redução de volume/peso; em vez disso, aumenta o volume/peso geral do lodo (descontando a perda de umidade devido à desidratação ou secagem). A porcentagem de adição de CaO ou Ca(OH)₂, corresponde ao aumento de volume (Teoh; Li, 2020). A alcalinização também pode reduzir alguns metais pesados entre 6% e 23% (Wong; Selvam, 2006).

- **Compostagem:** A compostagem é um método amplamente utilizado e eficaz para a estabilização de lodos. Nesse processo, os resíduos orgânicos passam por biodegradação, resultando em um produto final estável. O lodo compostado é uma substância semelhante ao húmus, livre de incômodos, no qual de 20% a 30% dos sólidos orgânicos voláteis são convertidos em dióxido de carbono (CO₂) e água (Metcalf; Eddy, 2016). A compostagem pode melhorar a atividade dos microrganismos levando a uma maior destruição de sólidos voláteis. Em uma investigação da co-digestão de lodo de esgoto desidratado e resíduos alimentares em diversas proporções de mistura e tempos de retenção de sólidos, Dai *et al.* (2013) constataram que num período de 20 dias, a redução de sólidos voláteis foi de 44,3%.

- **Secagem térmica:** A secagem térmica consiste na aplicação de calor para eliminar organismos patogênicos e evaporar a umidade presente no lodo, aumentando assim o teor de sólidos (Jordão; Pessôa, 2009). Esta técnica reduz a umidade em até 85–95% em peso de sólidos secos (ou seja, 5%–15% de umidade) (Teoh; Li, 2020).

- **Incineração:** A incineração é um dos métodos de tratamento termoquímico e está entre os mais eficazes para reduzir o volume/peso de lodo de esgoto, eliminar organismos patogênicos e reduzir poluentes e metais pesados. Hwang, Ouchi e Matsuto (2007) relataram que a incineração reduz o peso em 62% e Van Caneghem *et al.* (2010) relataram que houve a destruição líquida de bifenil poli-clorados (PCBs) e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) semelhantes a dioxinas para lodos co-incinerados com outros resíduos.

3.5 Alternativas para destinação final de lodo

O que torna o lodo um problema complexo é ele ser constituído por tudo aquilo que foi retirado do efluente e por estar majoritariamente em forma líquida. O primeiro motivo limita as possibilidades do uso do lodo e o segundo dificulta e encarece a sua disposição final.

Das alternativas de disposição final do lodo se destacam: aterro sanitário, e uso como condicionador de solo e fertilizante.

- Aterro sanitário: Local onde os resíduos são dispostos em valas compactadas e recobertas com solo até seu total preenchimento.
- Uso como fertilizante e condicionador de solo: Disposição do lodo tratado (biossólido) em solos agrícolas ou degradados com o objetivo de melhorar as condições de fertilização do solo e suprir as demandas de nutrientes das culturas cultivadas, ou fornecer condições para o desenvolvimento de vegetação natural.

Fonte: Lara; Andreoli; Pegorini, 2001.

3.6 Uso do lodo como fertilizante e condicionador de solo

Nos últimos anos, pesquisas têm explorado o potencial do lodo industrial como uma fonte de fertilizante para a agricultura, aproveitando sua variedade de compostos orgânicos e inorgânicos benéficos para as plantas, tais como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), além da matéria orgânica (Andreoli; Pegorini; Fernandes, 2001).

Esses estudos têm investigado os efeitos do lodo industrial nas propriedades do solo e na produtividade das culturas, com o objetivo de aumentar a eficiência agrícola e promover práticas sustentáveis de gestão de resíduos.

Mahapatra *et al.* (2013) conduziu uma pesquisa sobre a aplicação do lodo industrial, gerado em uma estação de tratamento de águas residuais de uma das maiores indústrias de fabricação de doces e salgadinhos da Índia, como fertilizante. Em sua pesquisa ele realizou experimentos utilizando a planta *Trigonella foenum graecum* (feno-grego) para descobrir o impacto do lodo industrial de processamento de alimentos nas propriedades do solo e na produtividade das culturas.

Em relação ao solo, Mahapatra *et al.* (2013) concluiu que a aplicação do lodo industrial resultou no aumento pH, CE (condutividade elétrica), CTC (capacidade de troca catiônica) e outros nutrientes, como matéria orgânica e fósforo no solo. Além de não ter encontrado qualquer indicação ou evidência de efeitos nocivos dos metais pesados provenientes do lodo na qualidade do solo. Os resultados obtidos na pesquisa de Mahapatra encontram-se nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Resultados da caracterização do solo antes e depois da aplicação do lodo

Parâmetros	Unidade	Caracterização do Solo	Lodo 10t/ha	Lodo 20t/ha	Lodo 30t/ha	Lodo 40t/ha	Lodo 50t/ha
pH	-	7,55	7,85	7,9	7,8	7,7	7,65
Condutividade Elétrica	MS/cm	0,37	1,3	1,35	1,4	1,45	1,54
Capacidade de Troca Catiônica	cmol/kg	73,63	65	57	51	48	42
Carbono Orgânico	%	0,51	2,1	2,9	4,8	5,1	6,4
Nitrogênio	kg/ha	1264,4	460	470	470	500	510
Fósforo	kg/ha	30,36	33	38	40	49	50
Potássio	kg/ha	76,86	40	41	43	45	46

Fonte: Mahapatra *et al.* (2013).

Tabela 4 - Absorção de metais pesados por planta cultivada em solo normal e em solo corrigido com lodo

Metais pesados	Unidade	Cultivada sem lodo	Cultivada com lodo
Cádmio	mg/kg	ND	ND
Cromo	mg/kg	ND	ND
Cobalto	mg/kg	ND	ND
Cobre	mg/kg	ND	ND
Ferro	mg/kg	0,07	0,16
Manganês	mg/kg	0,04	0,12
Níquel	mg/kg	ND	ND
Chumbo	mg/kg	ND	ND
Zinco	mg/kg	0,06	0,08

ND: Não detectado. Fonte: Mahapatra *et al.* (2013).

Houve uma redução nos nutrientes do solo (nitrogênio e potássio) pós-colheita, que de acordo com Mahapatra *et al.* (2013) indica a absorção pela planta feno-grego, resultando no aumento da produtividade.

A aplicação de diferentes quantidades de lodo demonstrou que houve uma deterioração na taxa de crescimento quando aplicado mais que 30 t/ha devido ao excesso de carga orgânica e de nutrientes acumulados no solo (Mahapatra *et al.*, 2013).

Majee *et al.* (2023) em sua pesquisa sobre adubo bio-orgânico preparado a partir de componentes orgânicos industriais e agrícolas (colágeno do couro wet blue, farinha de carne e ossos de frango e pó de cinza de casca de arroz) também concluiu que é possível utilizar lodo industrial como adubo. Neste estudo ele concluiu que o fertilizante bio-orgânico melhorou consideravelmente o crescimento da planta de pimentão, sendo nos 15 dias anteriores ao plantio a eficácia fertilizante do bio-orgânico foi maior que a do fertilizante químico, e resultando no crescimento das

plantas com fertilizante bio-orgânico de 3,81%, 15,25%, e o teor de clorofila nas folhas 18,28%, 40,81% superior ao fertilizante químico e a amostra de controle respectivamente.

No Brasil não tem sido diferente. Diversas pesquisas nacionais já publicadas obtiveram resultados positivos e mostraram que a reciclagem agrícola é benéfica para diversas culturas e espécies florestais, e desde 1999 existem normas com o objetivo de regulamentar esta prática e deixá-la segura para o meio ambiente e a saúde humana.

Pereira (2015), em sua pesquisa de mestrado, também obteve resultados positivos. Em sua pesquisa ela concluiu que a aplicação de lodo misto (industrial e sanitário), gerado em uma indústria do ramo alimentício localizada no estado de Goiás, contribuiu para o aumento da fertilidade do solo, indicado pelo aumento da saturação por bases, soma de bases, CTC, matéria orgânica, além da redução do alumínio trocável e da saturação por alumínio. As amostras foram coletadas com profundidade de 0-20cm e 20-40cm para a caracterização do solo antes e depois da aplicação do lodo, para analisar os resultados da aplicação. A Tabela 5 apresenta a comparação e os resultados da parcela de Solo Natural e da parcela de solo em que o lodo foi aplicado.

Tabela 5 - Comparação entre o Solo Natural e de solo com lodo

Parâmetro	Unidade	Solo natural (0-20cm)	Solo com lodo (0-20cm)	Solo natural (20-40cm)	Solo com lodo (20-40cm)
Saturação por bases	%	27	37	32	45
Soma de bases	mmol/kg	16	22	15	25
Capacidade de Troca Catiônica	mmol/kg	20	24	16	25
Matéria Orgânica	g/kg	29	31	19	22
Alumínio Trocável	mmol/kg	4	2	1	0
Saturação por alumínio	%	21	8	6	0

Fonte: Pereira (2015).

A saturação por bases, soma de bases e CTC são significativamente maiores no solo em que o lodo foi aplicado, enquanto o alumínio trocável e a saturação por alumínio são menores, o que indicou maior fertilidade nos solos com lodo do que no Solo Natural (Pereira, 2015).

3.6.1. Aspectos legais e normativos aplicados a lodos

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), do estado de São Paulo, foi uma das pioneiras a regulamentar o uso do lodo na agricultura no Brasil. Em 28 de outubro de 1999, a CETESB publicou a norma para aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projetos e operação, que se apoiou na regulamentação norte-americana e trata dos limites, monitoramento e práticas a serem observadas (Lima *et al.* 2011).

Atualmente, o uso do lodo de esgoto no solo é regulamentado pela Resolução nº 498 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Essa resolução estabelece critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos no solo. Publicada em 19 de agosto de 2020, ela é uma versão atualizada da Resolução CONAMA nº 375/2006, que foi revogada.

A Resolução CONAMA nº 498/2020 amplia as possibilidades de uso do lodo de esgoto no solo, desde que esse lodo passe por processos de tratamento e beneficiamento, sendo então denominado de biossólido. Com essa regulamentação, são estabelecidas normas para garantir a utilização segura e ambientalmente adequada desse recurso em atividades agrícolas ou em outros fins, evitando potenciais impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública.

No estado de São Paulo, a Norma Técnica P 4.230/2021 do Conselho Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) normatiza a aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico. Seu principal propósito é estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para o projeto, operação e aplicação de lodo de sistemas de tratamento biológico de efluentes líquidos em áreas agrícolas, visando à sustentabilidade dessa atividade, em consonância com as normas ambientais, de saúde pública e a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010.

Na Tabela 6 são apresentados os limites máximos para teores de substâncias inorgânicas para a utilização do lodo na agricultura da Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB.

Tabela 6 - Limites máximos para teores de substâncias inorgânicas no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Substâncias inorgânicas	Unidade	Limite máximo
Arsênio	mg/kg	41
Bário	mg/kg	1300
Cádmio	mg/kg	39
Chumbo	mg/kg	300
Cromo	mg/kg	1500
Mercúrio	mg/kg	17
Molibdênio	mg/kg	50
Níquel	mg/kg	420
Selênio	mg/kg	100
Zinco	mg/kg	2800

Fonte: CETESB (2021).

Na Tabela 7, estão os limites máximos, da Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB, para o indicador bacteriológico, *Escherichia Coli*, e organismos patogênicos que devem ser atendidos para utilização do lodo no solo.

Tabela 7 - Limites máximos para *Escherichia Coli* e Organismos patogênicos no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Parâmetro	Limite máximo
<i>Salmonella</i>	Ausência em 10g de ST
Ovos viáveis de helmintos	<0,25 ovo/g de ST
Vírus entéricos	<0,25 UFP ou UFF/g de ST
<i>Escherichia coli</i>	10 ³ NMP/g de ST
<i>Escherichia coli</i>	10 ³ NMP/g de ST

ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFP: Unidade Formadora de Placas; UFF: Unidade formadora de Floco.

Fonte: CETESB (2021).

Para as substâncias orgânicas, tanto a CETESB quanto a CONAMA, declaram que a Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) deverá definir quais serão analisadas em função das características específicas da bacia de esgotamento sanitário e dos efluentes recebidos na(s) ETE(s), considerando informações das fontes geradoras (tipologia), devendo justificar tecnicamente os parâmetros selecionados bem como os não selecionados. Porém, na Norma Técnica, a CETESB também declara que a UGL poderá utilizar como referência as substâncias constantes da lista de valores orientadores da Decisão de Diretoria CETESB nº 256, de 09 de

dezembro de 2021, que dispõe sobre a “Aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea” (CETESB, 2021).

Além das normas ambientais, há a Instrução Normativa Nº 27, publicada dia 5 de junho de 2006 e alterada pela IN DAS 07/2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) que estabelece os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo visando garantir a segurança das culturas a serem produzidas e da cadeia alimentar. Sendo uma instrução normativa do MAPA, ela é válida em todos os estados brasileiros.

A Tabela 8 apresenta os contaminantes e os valores máximos admitidos no lodo, determinado pela Instrução Normativa nº27/2006 do MAPA.

Tabela 8 - Valores máximos admitidos no lodo, determinado pela Instrução Normativa nº27/2006 do MAPA

Substâncias inorgânicas	Unidade	Limite máximo
Arsênio	mg/kg	20
Cádmio	mg/kg	3
Chumbo	mg/kg	150
Cromo hexavalente	mg/kg	2
Mercúrio	mg/kg	1
Níquel	mg/kg	70
Selênio	mg/kg	80

Fonte: BRASIL (2006)

Os limites máximos da Instrução Normativa nº27/2006 do MAPA para os organismos patogênicos são os mesmos que para a CETESB.

Portanto, para a utilização do lodo na agricultura é necessário garantir que todos os parâmetros estejam dentro dos limites máximos permitidos pela CONAMA, CETESB e MAPA.

3.7 Fibra de vidro em compósitos: Características e aplicações diversas

Os compósitos são formulados pela combinação de dois ou mais elementos, incluindo um agente de reforço e uma matriz ligante, como uma resina, visando conferir uma variedade de características, como resistência mecânica, resistência à corrosão, leveza e durabilidade. Uma das principais vantagens desse material é sua capacidade de ajustar a fabricação do compósito para adequá-lo às exigências

específicas do produto, proporcionando uma flexibilidade no processo de produção (Neto; Pardini, 2018).

Os compósitos possuem uma importância significativa na sociedade, desempenhando um papel crucial na produção de uma variedade de materiais, como plásticos reforçados com fibra de vidro, resinas epóxi com fibras de carbono, e compostos como micarta ou Celeron, além da combinação de fibras naturais de coco com polímeros ou cimentos (Cardoso, 2019).

O tipo de fibra mais utilizado em compósitos é a de vidro, devido ao seu custo acessível, alta resistência à tração e excelente estabilidade química. Elas conferem grande rigidez e resistência mecânica aos componentes em que são empregadas e apresentam uma grande variedade de aplicações (Neto; Pardini, 2018). Estas incluem caixas d'água, embarcações náuticas, carrocerias rodoviárias, dormentes para linhas de trem e pás eólicas para geração de energia elétrica sustentável, entre outras.

3.8 Produção da fibra de vidro

O trabalho foi desenvolvido em uma indústria de fibra de vidro que possui em sua planta um sistema de tratamento das águas residuárias. A seguir é descrita a tecnologia de produção da fibra de vidro empregada na indústria em questão. Esta descrição será utilizada para contextualizar a origem do efluente e do lodo nos próximos itens do trabalho.

A fabricação da fibra de vidro tem início com a mistura seca das matérias-primas que compõem o vidro. As matérias-primas são recebidas pulverizadas de acordo com a granulometria e composição adequadas.

A dosagem dos matérias-primas é realizada por meio de bateladas. Após serem dosadas e misturadas, as matérias-primas são transferidas para os silos de armazenamento e, na sequência, alimentada ao forno vidreiro por equipamentos denominados alimentadoras de composição.

A fusão é obtida pela queima de combustão de gás natural e de energia elétrica. Após a fusão, o vidro fundido é transportado por canais refratários, denominadas fornecedoras, até as estações produtoras chamadas de posições.

As gotas de vidro incandescente são impulsionadas pela coluna de vidro e pela gravidade, atravessando a fieira e, finalmente, atingindo o ponto de coleta. Neste momento, os fluxos intensos de ar-refrigerado em alta velocidade e os sprays de água

desmineralizada resfriam o filamento até a temperatura ambiente em questão de milésimos de segundos.

Com o filamento resfriado, é aplicada uma solução aquosa chamada sizing ou encimagem.

A encimagem é a etapa que transforma os filamentos de vidro em fibra de vidro. Esta solução aquosa é composta por uma combinação de silanos e outros elementos químicos que permitirão a compatibilidade química do filamento de fibra de vidro com a resina no momento de sua aplicação no processo de manufatura dos compósitos.

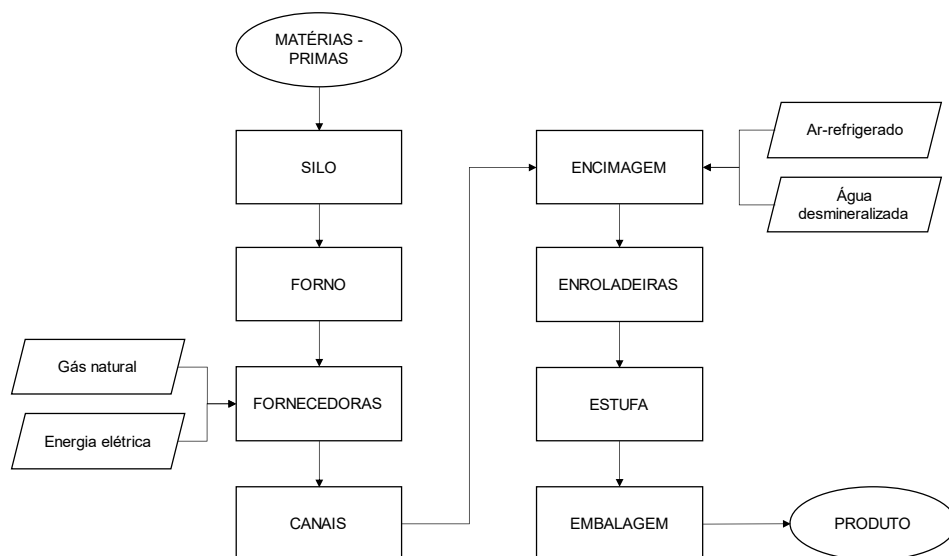
Logo após a aplicação da encimagem, o filamento vai para as enroladeiras. As enroladeiras são máquinas que enrolam a fibra de vidro sobre tubos de papelão, rotacionando partes chamadas de coletores. A velocidade de rotação dos coletores é determinada pelo tipo do produto em questão.

Uma vez que a fibra de vidro está enrolada em um tubete de papelão, ela segue para o processo de evaporação da água e cura, conhecido como estufa. A cura é o processo químico de ligação do silano à matriz vítrea da fibra.

Desta forma finaliza-se o sistema produtivo da fibra de vidro e as bobinas formadas são enviadas para a área de embalagem, onde serão embaladas, separadas em paletes e finalmente vendidas.

Na Figura 2 é possível visualizar um fluxograma do processo produtivo da fibra de vidro da Fábrica analisada.

Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação da fibra de vidro da Fábrica



Fonte: Autora (2024).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local da pesquisa

O trabalho foi desenvolvido em uma área industrial geradora do lodo e em uma área agrícola selecionada para sua aplicação.

4.1.1 Área industrial

O trabalho foi desenvolvido em uma empresa multinacional americana, localizada na cidade de Rio Claro/SP, especializada na fabricação de materiais para isolamento térmico e acústico, bem como produtos compósitos para diversos setores industriais. A Figura 3 apresenta o mapa do estado de São Paulo com a cidade de Rio Claro destacada.

Figura 3 – Município de Rio Claro, São Paulo.



Fonte: Wikipedia (2023).

A indústria referenciada, chamada de “Fábrica” daqui por diante, produz fibra de vidro para aplicações em diferentes materiais.

4.1.2 Área agrícola

A primeira área selecionada para o desenvolvimento do plano de aplicação está localizada no município de Engenheiro Coelho, no estado de São Paulo, em uma zona rural. O município cobre uma área de 109,94 km² e sua economia é predominantemente agrícola, destacando-se na produção de laranja e cana-de-açúcar. O clima em Engenheiro Coelho é do tipo Cfa (classificação de Köppen-

Geiger), subtropical úmido, com uma temperatura média anual de 21,6 °C e uma precipitação significativa de 1484 mm por ano, segundo a Câmara Municipal de Engenheiro Coelho/SP (2021).

A área é caracterizada por solos franco-arenosos, que são compostos majoritariamente por areia, com pequenas quantidades de silte e argila. Esses solos apresentam uma alta deficiência de nutrientes devido à baixa capacidade de troca de cátions (CTC), o que resulta em uma baixa capacidade de sustentação da produção agrícola. Solos franco-arenosos se esgotam rapidamente após poucos anos de uso e tendem a degradar-se rapidamente, necessitando de reposição constante de matéria orgânica e nutrientes (Spera *et al.*, 1998).

Recentemente, a área foi arrendada com a intenção de cultivar cana-de-açúcar para a produção de etanol. Após a caracterização, constatou-se que a área possui baixa fertilidade, exigindo a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes para viabilizar seu uso.

Portanto, a área, daqui em diante referida como “Solo Teste 1”, apresenta um forte potencial para a utilização de bio sólidos.

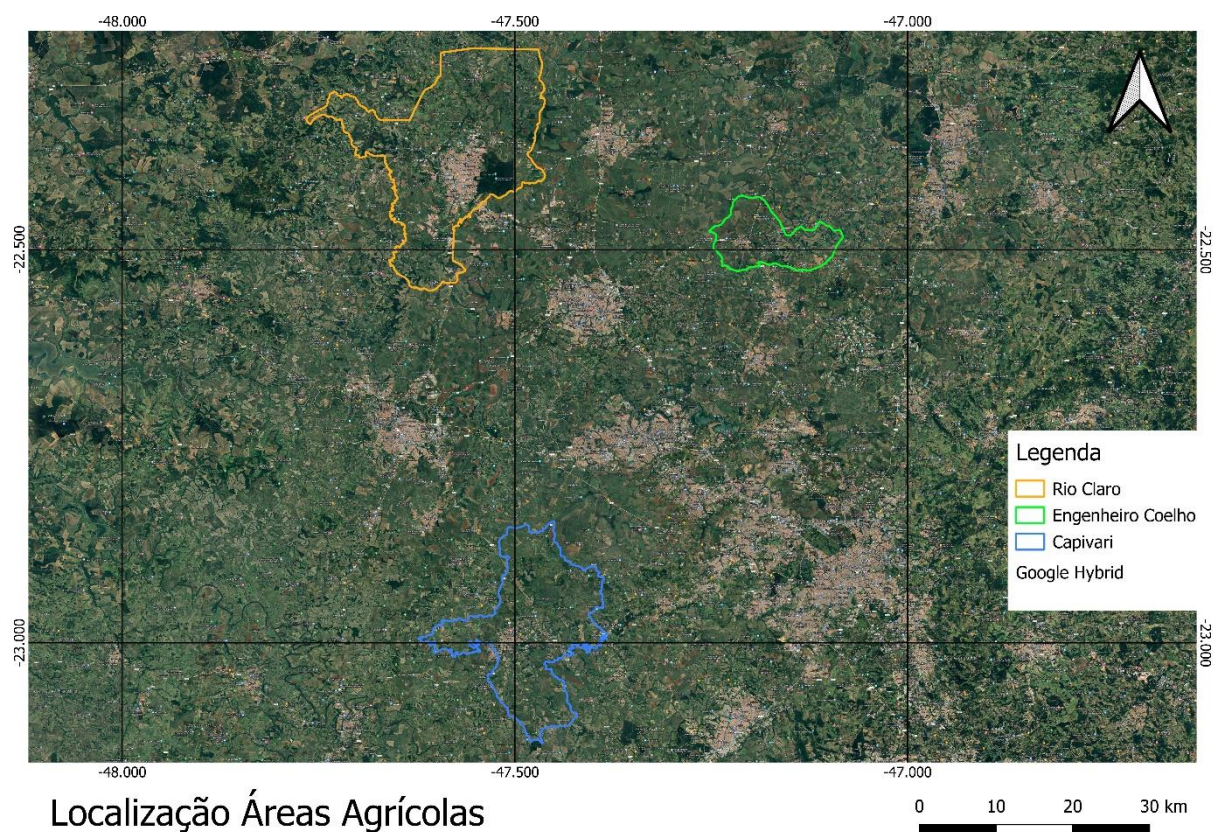
A segunda área selecionada para o desenvolvimento do plano de aplicação está localizada no município de Capivari, no estado de São Paulo. O clima em Capivari é do tipo Cwa (classificação de Köppen-Geiger), tropical úmido (Chiba, 2005).

O solo foi identificado como Argissolo Vermelho Amarelo, com características de fertilidade natural muito baixa a média, exigindo a aplicação de corretivos, fertilizantes e matéria orgânica para alcançar uma produtividade satisfatória nas culturas (Silva; Neto, 2021). Esse solo servirá como referência neste estudo para análise, uma vez que foi utilizado por Chiba (2005) como Solo Controle em seu estudo sobre a aplicação de lodo de esgoto no cultivo de cana-de-açúcar.

Sendo assim, a partir de agora, a segunda área será denominada “Solo Teste 2”.

Na Figura 4 é possível visualizar os municípios onde as áreas agrícolas estão localizadas e o município de Rio Claro.

Figura 4 – Localização dos municípios das áreas agrícolas, com a delimitação de Engenheiro Coelho/SP (linha verde), delimitação de Capivari/SP (linha azul) e a delimitação de Rio Claro/SP (linha amarela)

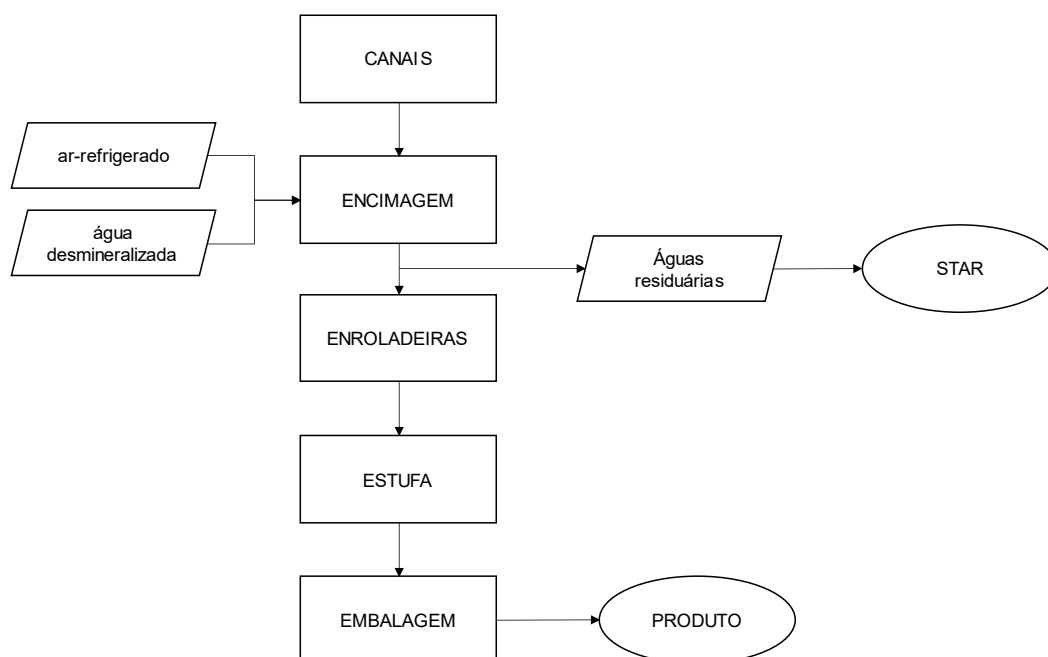


Fonte: Imagem extraída do Software Google Earth® (2024)

4.2 Origem do lodo

O lodo produzido na Fábrica é resíduo do sistema de tratamento de águas residuais, enquanto o efluente é gerado durante o processo produtivo, especificamente durante as fases de resfriamento do filamento e transformação do vidro em fibra pela solução aquosa “encimagem”, conforme descrito na seção 3.8 Produção da fibra de vidro. Ambos os resíduos são coletados por canaletas e encaminhados ao sistema de tratamento de efluentes por meio de bombas centrífugas. A Figura 5 ilustra o fluxograma de uma seção do processo produtivo da fibra de vidro, mostrando os pontos de geração de efluente e seus destinos.

Figura 5 – Fluxograma da geração do efluente e seu destino



Fonte: Autora (2024).

4.3 Caracterização do sistema de tratamento de águas residuárias e processos de tratamento do lodo

Na Fábrica, após a coleta do efluente, ele é destinado para o sistema de tratamento de águas residuárias, conhecido como STAR, que tem a função de tratar os efluentes gerados durante o processo de fabricação da fibra de vidro. O lodo é o resíduo gerado no STAR durante o tratamento do efluente.

O efluente assim que coletado, para entrar no tanque de equalização, passa por uma peneira que tem como objetivo retirar resíduos de fibras de vidro que foram carregadas durante a coleta. Já no tanque de equalização o efluente tem seu pH corrigido por ácido sulfúrico e seus constituintes ficam mais uniformes.

Após passar pelo tanque de equalização, o efluente é destinado para o tratamento físico-químico, que visa aglomerar as partículas com o uso de soda cáustica e policloreto de alumínio, e formar flocos para acelerar processo de sedimentação na etapa seguinte.

A etapa de sedimentação é realizada pelo decantador primário, que realiza a separação de sólidos suspensos da água através da gravidade e a água clarificada é removida pela parte superior do decantador. Durante este processo é gerado o lodo primário/químico da Fábrica.

Com a remoção das fibras por sedimentação no decantador primário, a água clarificada é destinada para o tanque biológico onde microrganismos aeróbios realizam a metabolização da matéria orgânica. Durante esta etapa é utilizado aeradores para o fornecimento de oxigênio.

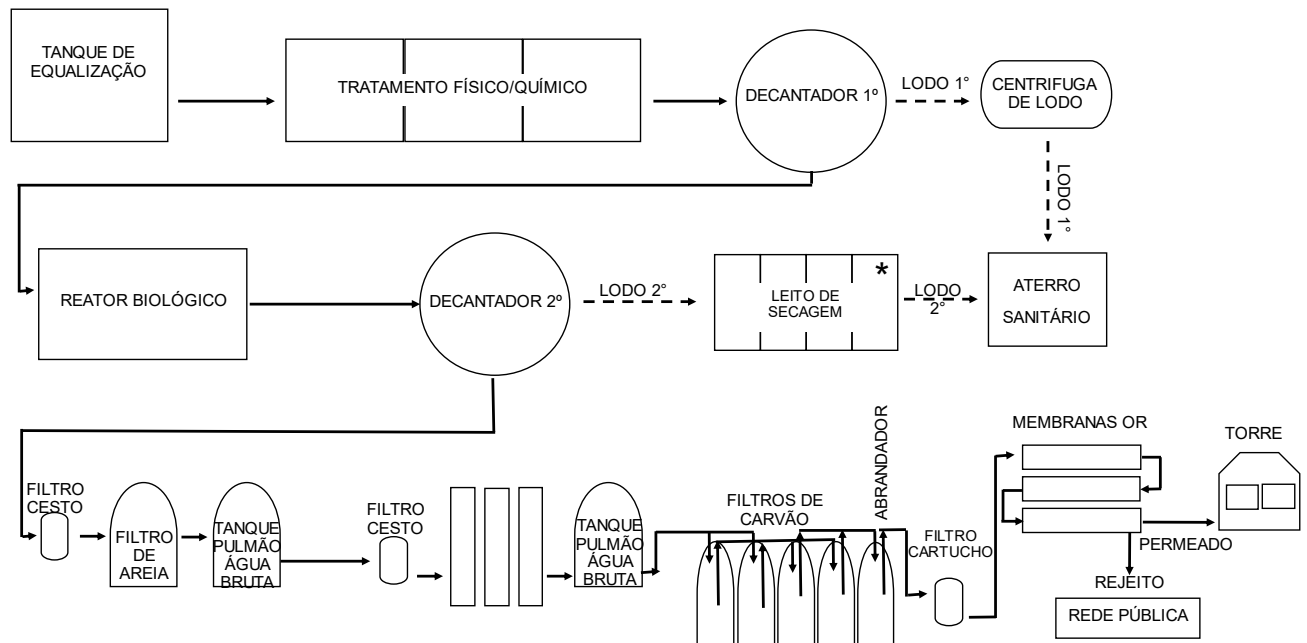
Após a metabolização da matéria orgânica, a água é destinada para o decantador secundário. O funcionamento segue o mesmo do decantador primário, mas irá remover a massa de microrganismos proveniente do tanque biológico. Durante este processo é gerado o lodo secundário/biológico da Fábrica.

Uma vez removido toda a matéria orgânica e os resíduos sólidos da água, ela passa pela ultrafiltração. A ultrafiltração tem como objetivo remover eficientemente sais de magnésio, sais de cálcio, sílica dissolvida e carbono orgânico da água residual e melhorar a qualidade da água antes dos processos adicionais.

A osmose reversa é uma etapa adicional após a ultrafiltração, utilizada pela Fábrica, para melhorar ainda mais a qualidade do efluente, ou seja, praticamente isento de sólidos suspensos e dissolvidos. É um processo complexo no qual a água é forçada através de uma membrana semipermeável sob pressão, essa membrana permite a passagem de moléculas de água, mas retêm a maioria dos solutos dissolvidos, como íons, sais, compostos orgânicos e outras impurezas. Na Fábrica ela é utilizada principalmente para a remoção dos sólidos que não foram totalmente retidos na ultrafiltração.

A Figura 6 representa um diagrama do STAR.

Figura 6 – Diagrama do sistema de tratamento de águas residuárias (STAR) da Fábrica



* = Ponto de coleta do lodo.

Fonte: Autora (2024).

Os pontos de geração de lodo no STAR, conforme apresentado no diagrama, são no decantador primário e no secundário.

O lodo primário/químico é direcionado para a centrífuga para aumentar a concentração de sólidos no lodo, tornando o lodo mais espesso para o transporte da Fábrica até o aterro sanitário municipal. Este equipamento faz a separação de sólidos e líquidos por meio da força centrífuga gerada pelo giro rápido do tambor.

Já o lodo secundário é direcionado ao leito de secagem. O leito de secagem de lodo é uma estrutura projetada que reduz o teor de umidade do lodo, transforma-o em um material estável biologicamente e de fácil manejo, que pode ser posteriormente utilizado de forma segura ou descartado de maneira mais eficiente.

Figura 7 – Leito de secagem do lodo secundário



Fonte: Autora (2024)

Após a desidratação, o lodo primário e o secundário são atualmente destinados ao aterro sanitário municipal. Salvo uma parcela que é direcionado para reciclagem através de uma empresa terceira. Em média, 20 toneladas de lodo secundário são descartadas mensalmente para o aterro sanitário.

4.4 Caracterização do lodo

Após o conhecimento do processo de tratamento de efluentes (STAR), procedeu-se à caracterização qualitativa e quantitativa do lodo secundário, com o intuito de explorar seu potencial de aplicação como fertilizante agrícola.

Para a caracterização, solicitou-se a um laboratório devidamente credenciado para realizar a caracterização do lodo primário e secundário gerado no STAR. Os metais foram determinados pelo método USEPA 6010C (USEPA, 2007), o mercúrio pelo método USEPA 245.7 (USEPA, 2005), coliformes, ovos viáveis de helmintos e *salmonella* conforme a USEPA (2003), pH pelo método 9045 (USEPA, 2004), compostos orgânicos voláteis conforme método 8260C (USEPA, 1996) e compostos orgânicos voláteis conforme método USEPA 8270D (USEPA, 2007).

O lodo primário não foi considerado neste estudo devido à restrição da CONAMA 498/2020 e da CETESB P4.230/2021 em relação aos lodos provenientes de decantadores primários por sua maioria conter resíduos não degradáveis, como no caso da Fábrica.

O processo de caracterização do lodo secundário foi realizado em várias etapas, cada uma delas com o objetivo específico de avaliar diferentes aspectos do resíduo.

Na primeira etapa, foram realizadas a coleta e preparação do lodo secundário, seguindo os protocolos estabelecidos pela ABNT NBR 10007 (ABNT, 2004) e as diretrizes da CETESB P4.230/2021. Este processo envolveu a obtenção de amostras representativas do lodo no leito de secagem, assegurando sua representatividade para as análises posteriores.

Figura 8 - Coleta do lodo secundário no leito de secagem para análise



Fonte: Autora (2024).

Em seguida, na segunda etapa, foram conduzidas as análises de contaminantes inorgânicos e organismos patogênicos. Essas análises visaram avaliar a presença de uma série de parâmetros, como pH, Sólidos Totais, Umidade, Sólidos Voláteis, uma variedade de metais pesados, incluindo Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Molibdênio, Níquel, Selênio e Zinco, e a presença de organismos patogênicos como *Salmonellas*, Ovos Viáveis de Helminths e

Escherichia Coli. Essa fase foi realizada em conformidade com as regulamentações estabelecidas pela CONAMA 498/2020 e pela CETESB P4.230/2021.

Na terceira etapa, o lodo secundário foi submetido à classificação de periculosidade, conforme definido pela ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004). Além disso, foi obtido o extrato do lixiviado, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 10005 (ABNT, 2004). Essas medidas foram tomadas para determinar os riscos potenciais que o lodo representa para o meio ambiente e para a saúde pública.

Por fim, na quarta etapa, foram realizadas as análises de potencial agronômico. Isso incluiu a avaliação da quantidade de nutrientes de interesse agronômico presentes no lodo, como fósforo, nitrogênio e potássio, conforme estabelecido pela CONAMA 498/2020 e pela CETESB P4.230/2021.

Figura 9 - Amostras do lodo secundário para análise



Fonte: Autora (2024).

Figura 10 - Amostras do lodo secundário para análise



Fonte: Autora (2024).

Adicionalmente, foi realizada uma segunda análise para o parâmetro Arsênio (As) que havia apresentado resultados superiores aos limites definidos nas normativas. Essa análise foi solicitada após uma revisão do histórico de laudos dos lodos primário e secundário, bem como dos efluentes brutos no tanque de equalização, referentes aos anos de 2022 e 2023, que não detectaram As.

O resultado da reanálise do As, assim como o da caracterização do lodo primário e secundário, encontra-se no capítulo 5 Resultados e discussões.

A partir da compreensão da composição e das características do lodo, será possível estabelecer diretrizes e critérios dos caminhos a serem percorridos.

4.5 Seleção da área e caracterização do solo

A seleção de um solo adequado para receber o lodo industrial como fertilizante, foi uma das etapas principais deste estudo. Nesse sentido, buscou-se identificar um solo caracterizado pela baixa presença de macronutrientes, micronutrientes e matéria orgânica, e isento de contaminação por metais pesados. Esta seleção teve como objetivo garantir não apenas a eficácia do lodo como fertilizante, mas também prevenir potenciais impactos ambientais adversos associados à sua utilização.

O solo inicialmente investigado estava localizado na região de Ipeúna/SP, foi classificado como arenoso, com baixa quantidade de matéria orgânica. Apresentava, ainda, sinais de degradação ambiental devido ao cultivo extensivo de cana-de-açúcar. Em princípio, este solo parecia ser uma opção viável para a aplicação do lodo como fertilizante. No entanto, os cálculos da taxa de aplicação revelaram que já possuía quantidades suficientes de fósforo e potássio, possivelmente devido à adubação constante, via fertilizantes solúveis e fertirrigação com vinhaça.

Já o segundo solo avaliado, situado na região de Engenheiro Coelho/SP, foi classificado como franco-arenoso e apresentava baixos teores de macronutrientes e matéria orgânica. Devido à ausência de cultivo prévio, não foi exposto à aplicação de fertilizantes minerais. Contudo, durante a análise, foram detectadas elevadas concentrações de mercúrio no solo, o que impossibilitou sua utilização para a aplicação de lodo como fertilizante.

Por fim, o Solo Teste 1 efetivamente utilizado neste estudo, localizado na região de Engenheiro Coelho/SP e detalhado na seção 4.1.2 Área agrícola, foi classificado como franco-arenoso. Embora seja considerado propício para o cultivo de cana-de-açúcar, requer a aplicação de fertilizantes para aprimorar suas condições.

A segunda etapa desta seleção consistiu na caracterização do Solo Teste 1. Esta caracterização foi realizada por um laboratório devidamente credenciado e especializado na análise de solo, que seguiu para os componentes inorgânicos o método da USEPA 6010C (USEPA, 2007) e para a fertilidade o método de Raij *et al.* (2001). Nesta caracterização analisou os seguintes parâmetros: pH, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn), sulfato, alumínio trocável (Al), matéria orgânica, acidez potencial (H+Al), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases (V), Soma das Bases (SB), e metais pesados, incluindo arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e selênio (Se).

As amostras de solo foram coletadas a uma profundidade de 0–0,2 m para análises de fertilidade e quantificação de metais pesados, seguindo as orientações de Raij *et al.* (2001). O pH das amostras foi determinado em solução de KCl; a matéria orgânica foi medida pelo método colorimétrico; o fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram extraídos por resina de troca iônica; o sulfato foi extraído por fosfato de cálcio e determinado por turbidimetria; o alumínio trocável foi extraído com solução de cloreto de potássio a 1 mol/L; a acidez potencial foi determinada com acetato de cálcio em pH 7; a saturação por bases (V) foi calculada pela relação SB/CTC; e os metais pesados foram extraídos usando uma solução de DTPA-TEA em pH 7,3.

O Solo Teste 2, segundo solo efetivamente utilizado neste estudo e destinado ao cultivo de cana-de-açúcar, foi caracterizado por Chiba (2005). Onde foram analisados o pH, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn), Ferro (Fe), Manganês (Mn), alumínio trocável (Al), matéria orgânica,

acidez potencial (H+Al), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases (V), Soma das Bases (SB), e metais pesados, incluindo cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr) e níquel (Ni).

Para as análises de fertilidade do solo e quantificação de metais pesados, foram coletadas amostras nas profundidades de 0-0,2 m seguindo esquema proposto por Mattiazzo (1982) para solos cultivados com cana-de-açúcar; a CTC foi determinada segundo metodologia proposta por Gillman e Sumpter (1986); a quantificação dos teores totais dos metais pesados foi realizada utilizando a metodologia descrita por Sastre *et al.* (1999); e a quantificação dos micronutrientes foram avaliados de acordo com a metodologia proposta por Abreu e Andrade (2001).

A terceira etapa desta seleção é uma das decisórias para a utilização dos solos selecionados, foi comparar a quantidade de substâncias químicas presentes com o Valor de Prevenção (VP) da Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021, da CETESB.

A Tabela 9 apresenta os Valores de Prevenção estabelecidos pela CETESB DD N.º 125/2021.

Tabela 9 - Valores orientadores para solo, determinado pela Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E da CETESB

Parâmetro	Unidade	VP
Arsênio	mg/kg	15
Bário	mg/kg	120
Boro	mg/kg	-
Cádmio	mg/kg	1,3
Chumbo	mg/kg	72
Cobre	mg/kg	60
Cromo	mg/kg	75
Mercúrio	mg/kg	0,5
Níquel	mg/kg	30
Selênio	mg/kg	1,2
Zinco	mg/kg	86

VP: Valor de prevenção.

Fonte: CETESB (2021)

A CETESB P4.230/2021 determina que a aplicação não será permitida caso os resultados da caracterização, avaliação e monitoramento do solo demonstrem, isolada ou concomitantemente, concentração de substâncias químicas de interesse igual ou acima dos Valores de Prevenção estabelecidos pela CETESB DD N.º 125/2021.

Sendo assim, todos os solos que foram selecionados para o estudo tiveram que passar por essa fase preliminar para poder prosseguir para o plano de aplicação.

4.6 Parâmetros para utilização do lodo na agricultura

O uso do lodo de esgoto no solo é regulamentado pela Resolução nº 498 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), pela Norma Técnica P 4.230/2021 do Conselho Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e pela Instrução Normativa nº 27 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Nas três são definidos parâmetros e orientações para que o uso seja seguro e ambientalmente adequado em atividades agrícolas, evitando potenciais impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública.

Como critério para a amostragem do lodo, a CETESB P4.230/2021 determina que tanto as coletas de amostras quanto as análises laboratoriais deverão ser realizadas de acordo com normas nacionais ou internacionais mais recentes, publicadas por entidades tais como Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), United States Environmental Protection Agency (USEPA), sob responsabilidade de um profissional legalmente habilitado. Além de considerar as diretrizes e procedimentos da ABNT NBR 10007 (ABNT, 2004).

Para a utilização do lodo, a CONAMA 498/2020 e a CETESB P4.230/2021 determinam limites máximos para teores de substâncias inorgânicas. Na Tabela 10 é apresentado os limites máximos.

Tabela 10 - Limites máximos para teores de substâncias inorgânicas no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Substâncias inorgânicas	Unidade	Limite máximo
Arsênio	mg/kg	41
Bário	mg/kg	1300
Cádmio	mg/kg	39
Chumbo	mg/kg	300
Cromio	mg/kg	1500
Mercúrio	mg/kg	17
Molibdênio	mg/kg	50
Níquel	mg/kg	420
Selênio	mg/kg	100
Zinco	mg/kg	2800

Fonte: CETESB (2021)

Para as substâncias orgânicas, tanto a CETESB P4.230/2021 quanto a CONAMA 498/2020, declaram que a Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) deverá definir quais serão analisadas em função das características específicas da bacia de esgotamento sanitário e dos efluentes recebidos na(s) ETE(s), considerando informações das fontes geradoras (tipologia), devendo justificar tecnicamente os parâmetros selecionados bem como os não selecionados. Além disso, na Norma Técnica, a CETESB P4.230/2021 também declara que a UGL poderá utilizar como referência as substâncias constantes da lista de valores orientadores da Decisão de Diretoria CETESB N.º 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021, que dispõe sobre a aprovação da “Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea” (CETESB, 2021).

O Anexo A – Substâncias orgânicas que constam na Decisão de Diretoria CETESB N.º 125/2021/E, apresenta estas substâncias.

Além dos valores para substâncias orgânicas e inorgânicas, a CETESB P4.230/2021 determina os limites máximos para o indicador bacteriológico, *Escherichia coli*, e organismos patogênicos que devem ser atendidos para utilização do lodo em solo.

Na Tabela 11, é possível verificar estes limites.

Tabela 11 - Limites máximos para *Escherichia Coli* e Organismos patogênicos no lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Parâmetro	Limite máximo
<i>Salmonella</i>	Ausência em 10g de ST
Ovos viáveis de helmintos	<0,25 ovo/g de ST
Vírus entéricos	<0,25 UFP ou UFF/g de ST
<i>Escherichia coli</i>	10 ³ NMP/g de ST
<i>Escherichia coli</i>	10 ³ NMP/g de ST

ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFP: Unidade Formadora de Placas; UFF: Unidade formadora de Foco.

Fonte: CETESB (2021).

O MAPA, através da Instrução Normativa nº 27, publicada no dia 05 de junho de 2006 e alterada pela IN DAS 07/2016, também possui orientações e estabelece limites máximos de contaminantes no lodo para ser aplicado na agricultura. Esta IN define valores para contaminantes e organismos patogênicos. A Tabela 12 apresenta os valores máximos permitidos para os contaminantes presentes no lodo a ser utilizado como fertilizantes ou condicionador de solo.

Tabela 12 - Limites máximos para contaminantes no lodo, determinado pela Instrução Normativa nº27/2006 do MAPA

Substâncias inorgânicas	Unidade	Limite máximo
Arsênio	mg/kg	20
Cádmio	mg/kg	3
Chumbo	mg/kg	150
Cromo hexavalente	mg/kg	2
Mercúrio	mg/kg	1
Níquel	mg/kg	70
Selênio	mg/kg	80

Fonte: BRASIL (2006)

Os valores máximos permitidos para os organismos patogênicos são os mesmos que os definidos pela CETESB P4.230/2021 (Tabela 11).

Para o lodo poder ser aplicado como fertilizante na agricultura, é necessário inicialmente passar pela CONAMA 498/2020, CETESB P4.230/2021 e MAPA IN 27/2006. Ou seja, não pode ultrapassar nenhum dos limites estabelecidos.

4.7 Plano de aplicação do lodo na agricultura

Na gestão sustentável de resíduos industriais, a aplicação do lodo como fertilizante na agricultura demanda uma abordagem cuidadosa, em consonância com as normativas ambientais vigentes. Nesse contexto, as diretrizes estabelecidas pela CONAMA 498/2020 e pela CETESB P4.230/2021 desempenham um papel crucial na determinação da dose apropriada de aplicação do lodo no solo, levando em consideração tanto as necessidades nutricionais das culturas quanto a proteção do meio ambiente.

Esta seção detalha o processo de planejamento para a aplicação do lodo na agricultura, seguindo as orientações das normativas mencionadas. Os cálculos e procedimentos descritos têm como objetivo não apenas cumprir os requisitos regulatórios, mas garantir uma aplicação responsável do lodo como fertilizante agrícola.

Inicialmente, é essencial a análise dos resultados das análises do lodo e do solo para confirmar que estão dentro dos limites permitidos para as substâncias químicas de interesse.

Posteriormente, caso tanto o lodo quanto o solo estejam abaixo dos limites permitidos, é realizado o cálculo da taxa de aplicação do lodo. Esse cálculo determina

a quantidade de lodo que deve ser aplicada por hectare, considerando a diferença entre a quantidade recomendada de nutrientes e a quantidade disponível no solo, bem como a quantidade presente no próprio lodo.

Para a recomendação nutricional da cana-de-açúcar, cultura a ser estudada conforme mencionado na seção 4.1.2 Área agrícola, foi considerado o Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC (Carantella *et al.*, 2022) como referência para o cálculo das quantidades ideais de nutrientes a serem aplicadas, conforme orientação da CETESB P4.230/2021.

A Tabela 13 apresenta as quantidades recomendadas de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) a serem aplicadas durante o cultivo de cana-de-açúcar no seu primeiro corte, com base na análise de solo e na produtividade esperada, de acordo com o Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC (Carantella *et al.*, 2022).

Tabela 13 - Quantidades indicadas de nitrogênio, fósforo, potássio, boro, cobre, manganês e zinco para aplicar na cana-de-açúcar, segundo Boletim 100 do IAC

Produtividade esperada	Nitrogênio	P resina, mg/dm ³				K+ trocável, mmolc/dm ³			
		< 7	7 - 15	16 - 40	> 40	< 0,8	0,8 - 1,5	1,6 - 3	> 3
t/ha	N, kg/ha	P ₂ O ₅ , kg/ha				K ₂ O, kg/ha			
< 100	30	180	140	80	40	140	120	100	60
100 - 130	30	180	160	100	60	160	140	120	80
130 - 150	30	200	180	120	80	180	160	140	100
150 - 170	30	200	180	140	100	200	180	160	120
> 170	30	200	200	140	100	220	200	180	120

B		Cu		Mn		Zn	
Teor no solo	Dose a aplicar	Teor no solo	Dose a aplicar	Teor no solo	Dose a aplicar	Teor no solo	Dose a aplicar
mg/dm ³	Kg/ha	mg/dm ³	Kg/ha	mg/dm ³	Kg/ha	mg/dm ³	Kg/ha
<0,2	2	< 0,3	5	< 1,2	5	< 0,6	10
0,2 - 0,6	1	0,3 - 0,8	0	1,2 - 5	0	0,6 - 1,2	5
> 0,6	0	> 0,8	0	> 5	0	> 1,2	2

Fonte: Carantella *et al.* (2022)

Após verificada a demanda de nutrientes para a cana-de-açúcar (Tabela 13), calcula-se a quantidade teórica de lodo que deverá ser aplicada por hectare para suprir as quantidades de nutrientes determinadas pelo Boletim 100 do IAC (Tabela 13). Porém, esta quantidade teórica de lodo calculada somente poderá ser aplicada

se as concentrações máximas de substâncias químicas no solo, atenderem aos “valores máximos admissíveis” (VMA) definidos pela CETESB P4.230/2021. Assim, a quantidade de lodo que será efetivamente aplicada envolve o cálculo do teor de referência no solo (TRS), que representa a quantidade de substâncias químicas presentes no solo por hectare, antes da aplicação do lodo. Caso a quantidade teórica de lodo calculada acarretar numa concentração acima dos “valores máximos admissíveis” (VMA) definidos pela CETESB P4.230/2021, a taxa de aplicação será recalculada tendo como limite não ultrapassar os valores máximos admissíveis” e não mais a quantidade de nutrientes estabelecido pelo boletim 100 do IAC.

A Tabela 14 apresenta os valores máximos admissíveis (VMA) de substâncias químicas de interesse, admissíveis no solo pela aplicação do lodo.

Tabela 14 - Valor máximo admissível de substâncias químicas de interesse no solo pela aplicação do lodo, determinado pela Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Parâmetro	Unidade	VMA
Arsênio	kg/ha	39
Bário	kg/ha	312
Cádmio	kg/ha	3,3
Chumbo	kg/ha	187
Cobre	kg/ha	156
Cromo	kg/ha	195
Mercúrio	kg/ha	1,3
Níquel	kg/ha	78
Selênio	kg/ha	3,1
Zinco	kg/ha	223

VMA: Valor máximo admissível.

Fonte: CETESB (2021)

Caso o TRS de todas as substâncias químicas de interesse seja menor que o respectivo VMA (Tabela 14), passa-se à verificação do aporte por meio do cálculo do Aporte Teórico (AT) e do Aporte Possível (AP) de cada substância.

O AT representa a quantidade teórica de substâncias químicas no solo após a aplicação do lodo, calculada com base na taxa de aplicação e na quantidade presente no lodo. Já o AP define o limite máximo de substâncias químicas permitido no solo após a aplicação do lodo, considerando o TRS e o VMA.

Após a determinação do AP e do AT, ambos são comparados, e o lodo poderá ser aplicado no solo se o AT de todas as substâncias químicas de interesse for menor que o respectivo AP, com valores teóricos também inferiores a 80% do AP.

A seguir são apresentadas todas as fórmulas utilizadas para a realização do plano de aplicação do lodo na agricultura, de acordo com o estabelecido pela CETESB P4.230/2021.

Conforme descrito, após verificar que os resultados das análises do lodo e do solo estão dentro dos valores máximos permitidos para as substâncias químicas, o primeiro cálculo realizado é para a definição da taxa de aplicação teórica. Esta taxa é definida pela seguinte fórmula:

$$TA [t/ha] = (NR [kg/ha] - NS [kg/ha]) / NL [kg/t]$$

Onde:

TA = Taxa de aplicação do lodo, em t/ha;

NR = Quantidades de nutrientes indicadas pelo Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC (Carantella *et al.*, 2022), em kg/ha;

NS = Quantidade dos nutrientes detectados na caracterização inicial do solo, em kg/ha;

NL = Quantidade de nutrientes detectados na caracterização do lodo, em kg/t.

Outras substâncias presentes no lodo, como potássio, fósforo, cobre e zinco, que são potenciais nutrientes para as plantas, foram calculadas da mesma forma e incorporadas nas análises subsequentes, desde que a taxa de aplicação não excedesse as exigências da cultura para nenhum desses nutrientes. Esta exigência se justifica uma vez que os lodos de esgoto são ricos em nitrogênio o qual, se aplicado em quantidades maiores do que a capacidade de absorção da cultura, apresenta potencial poluente das águas subterrâneas devido à lixiviação do excesso deste nutriente (Boeira, 2009; Dynia; Boeira; Souza, 2006 *apud* Pereira, 2015) e a aplicação de outros nutrientes em excesso pode causar toxicidade nas plantas, apresentando aumento das folhas e redução da qualidade dos frutos (Aegro, 2024).

O segundo cálculo realizado foi o do TRS, que representa a quantidade de substâncias químicas presentes no solo por hectare, antes da aplicação do lodo. O cálculo do TRS é feito pela seguinte fórmula:

$$TRS [kg/ha] = 2,6 \times TS [mg/kg]$$

Em que:

TRS = Teor de referência no solo para cada uma das substâncias químicas de interesse, em kg/ha;

TS = Teor da substância no solo, em mg/kg;

2,6 = Constante obtida pela multiplicação de 10^{-6} pela quantidade de solo por hectare equivalente a 2.600.000 kg/ha (considerando a camada arável de 20 cm de profundidade e a densidade do solo de 1.300 kg/m³).

Os resultados do teor de referência no solo (TRS) foram comparados com o valor máximo admissível (VMA) determinado na CETESB P.2030/2021.

Em seguida, avançou-se para a terceira etapa, que consistiu no cálculo do aporte teórico (AT) e do aporte possível (AP). O AT foi calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$AT_n \text{ [kg/ha]} = TAn \text{ [t/ha]} \times Tn \text{ [mg/kg]} \times 10^{-3}$$

Em que:

n = Número da aplicação, que no presente estudo será 1 por ser a primeira aplicação;

AT = Aporte teórico da substância no solo via aplicação do lodo, em kg/ha;

TA = Taxa de aplicação, em t/ha, a qual corresponde ao menor valor calculado dentre todos os nutrientes;

T = Teor da substância química de interesse no lodo, em mg/kg, obtido na caracterização do lodo para a aplicação.

Já o cálculo do AP foi feito pela seguinte fórmula:

$$AP_n \text{ [kg/ha]} = VMA \text{ [kg/ha]} - TRS \text{ [kg/ha]}$$

Em que:

n = Número da aplicação, que no presente estudo será 1 por ser a primeira aplicação;

AP = Valor do aporte possível para cada uma das substâncias químicas de interesse, em kg/ha;

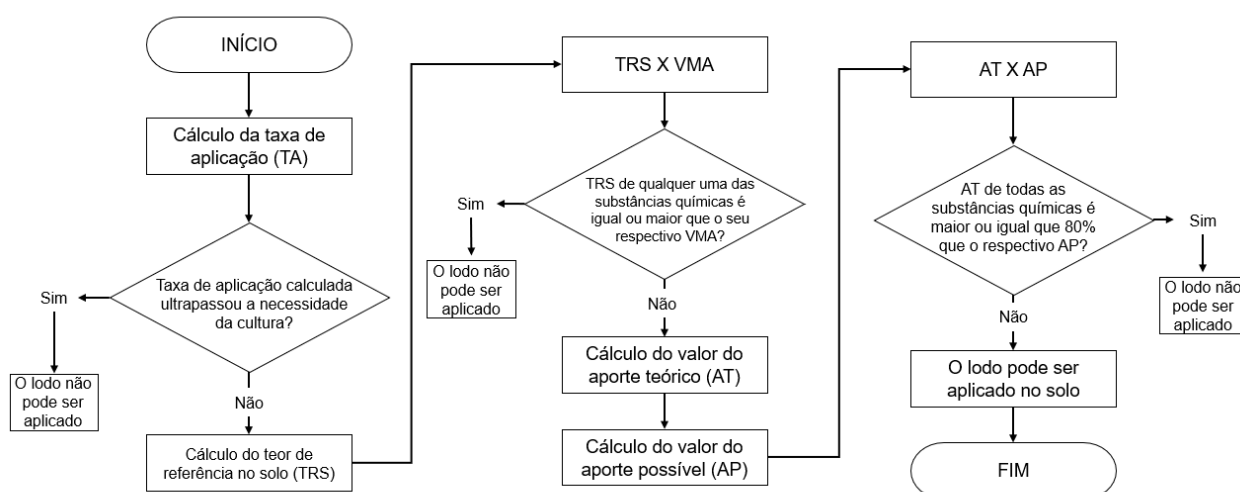
VMA = Valor máximo admissível no solo da substância química de interesse, em kg/ha;

TRS = Teor de referência no solo (TRS) para cada uma das substâncias químicas de interesse, em kg/ha.

Após a determinação do AP e do AT, ambos são comparados, e a CETESB P4.230/2021 define que o lodo poderá ser aplicado no solo se o AT de todas as substâncias químicas de interesse for menor que o respectivo AP, com valores teóricos também inferiores a 80% do AP.

Na Figura 11 é possível visualizar um fluxograma do plano de aplicação do lodo na agricultura, desde o cálculo da taxa de aplicação até a comparação do aporte teórico e do aporte possível, para definir se será possível aplicar o lodo no solo.

Figura 11 - Fluxograma do plano de aplicação do lodo na agricultura



Fonte: Adaptado de CETESB (2021)

Além disso, é importante destacar que a CETESB P4.230/2021 determina que este fluxo deverá ser feito para cada nova aplicação do lodo para a verificação da taxa de aplicação e da concentração das substâncias químicas de interesse no solo. No presente trabalho, este fluxo foi realizado apenas para a primeira aplicação do lodo.

4.8 Viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica desempenha um papel fundamental na determinação das estratégias mais adequadas para o manejo do lodo gerado. Esta seção detalha os procedimentos e cálculos envolvidos na análise de viabilidade

econômica do transporte e aplicação do lodo como fertilizante na agricultura, levando em consideração os atuais custos associados à disposição no aterro sanitário municipal e os benefícios econômicos resultantes de sua utilização na adubação agrícola.

A primeira etapa dessa análise envolveu o cálculo dos custos, tanto o do custo atual do lodo para transporte e disposição no aterro sanitário municipal, quanto o com a aquisição de insumos.

O cálculo do custo atual para a disposição do lodo no aterro sanitário municipal considerou o valor cobrado pela Prefeitura de Rio Claro pela disposição do lodo no aterro, o peso mensal do lodo descartado e os custos do transporte até o aterro.

Além disso, com a finalidade de estimar a economia de custo com a aquisição de insumos (adubação química) os quais seriam fornecidos com a aplicação do lodo, calculou-se o custo de adubação por hectare utilizando fertilizante mineral, considerando as quantidades determinadas pela recomendação do Boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) (Carantella *et al.*, 2022) para as características do solo. Essa quantidade foi então multiplicada pelo custo de cada fertilizante mineral necessário.

A segunda etapa consistiu em delimitar a distância máxima que o lodo pode ser transportado, sem gerar custos adicionais para a Fábrica em relação ao custo atual com a disposição no aterro sanitário. Esse cálculo considerou o custo atual para dispor o lodo no aterro sanitário municipal e o valor cobrado pela empresa terceirizada para transportar o lodo para qualquer localidade sem ser para o aterro sanitário municipal, sendo cobrado por quilômetro percorrido.

Com base nessas análises, foi possível prosseguir para a terceira etapa, na qual se calculou a economia para o proprietário da área agrícola ao adubar com lodo ao invés de fertilizante mineral. Essa economia foi determinada com o cálculo da porcentagem de nutrientes que a menor taxa de aplicação do lodo poderá suprir por hectare da taxa de aplicação calculada para os demais nutrientes, e depois multiplicando este valor com o custo para cada fertilizante mineral, baseado na quantidade destes fertilizantes recomendados para a cultura.

A seguir são apresentadas todas as fórmulas utilizadas para a análise da viabilidade econômica.

Conforme mencionado anteriormente, os primeiros cálculos realizados abordaram os custos atuais, tanto os relacionados à Fábrica para a disposição do lodo

no aterro sanitário quanto os associados ao proprietário para a adubação com fertilizante mineral.

O cálculo do custo atual do lodo para disposição no aterro sanitário municipal e o custo de transporte foi realizado pela seguinte fórmula:

$$CL \text{ [R\$/mês]} = ASM \text{ [R\$/t]} * PL \text{ [t/mês]} + (PL \text{ [t/mês]} * T \text{ [R\$/t]}) + 420 \text{ [R\$/un]}$$

Em que:

CL = Custo atual do lodo para dispor no aterro sanitário municipal, em R\$/mês;

ASM = Valor cobrado pela Prefeitura de Rio Claro para dispor o lodo no aterro sanitário municipal, R\$/t;

PL = Lodo descartado, em t/mês;

T = Valor cobrado pela empresa terceira para transportar o lodo da Fábrica até o aterro sanitário municipal, em R\$/t;

420 = Custo cobrado pela empresa terceira para alugar a unidade da caçamba com capacidade de 20 toneladas, em R\$/un.

O custo de adubação por hectare para cada fertilizante mineral foi calculado pela seguinte fórmula:

$$CH \text{ [R\$/ha]} = QR \text{ [t/ha]} * FM \text{ [R\$/t]}$$

Onde:

CH = Custo para cada fertilizante N, P e K, em R\$/ha;

QR = Quantidade recomendada para cada nutriente indicado pelo Boletim 100 do IAC (Carantella *et al.*, 2022) para as características do solo, em t/ha;

FM = Custo do fertilizante mineral, em R\$/t.

Após realizar os custos atuais, o segundo cálculo consistiu em delimitar a distância que o lodo pode ser transportado, sem gerar custos adicionais para a Fábrica em relação ao custo com a disposição no aterro sanitário, pela seguinte fórmula:

$$DL \text{ [km/mês]} = CL \text{ [R\$/mês]} / (T \text{ [R\$/km]} * 2)$$

Em que:

DL = Distância limite do transporte, em km/mês;

CL = Custo atual do lodo para dispor no aterro sanitário municipal, em R\$/mês;

T = Valor cobrado por quilômetro pela empresa terceira, em R\$/km;

2 = Considerando o percurso de retorno do caminhão.

Por fim, com base nos cálculos de custos realizados, foi possível conduzir o terceiro cálculo da viabilidade econômica, que consistiu em determinar a economia para o proprietário da área agrícola ao adubar com lodo em vez de fertilizante mineral, a economia foi calculada utilizando duas fórmulas.

A primeira consistiu na verificação da porcentagem que o lodo pode suprir dos fertilizantes N, P e K a partir da menor taxa de aplicação (TA) calculada para os nutrientes:

$$QSL [\%] = MTA [t/ha] * 100 / TA [t/ha]$$

Em que:

QSL = Quantidade de nutriente suprida pelo lodo, em %;

MTA = Menor taxa de aplicação calculada entre os nutrientes N, P, K, Cu e Zn, em t/ha;

TA = Taxa de aplicação do lodo necessária para suprir cada nutriente da cultura, em t/ha.

A segunda consistiu no cálculo da economia de fato, calculando a quantidade em reais que o proprietário terá a partir da utilização do lodo:

$$EF [R\$/ha] = CH [R\$/ha] * QSL [\%]$$

Em que:

EF = Economia que o proprietário do solo terá ao adubar com lodo ao invés de fertilizante mineral, em R\$/ha;

CH = Custo para cada fertilizante N, P e K, em R\$/ha;

QSL = Quantidade de nutriente suprida pelo lodo, em %.

Esses cálculos ofereceram uma visão ampla e fundamentada da viabilidade econômica relacionada ao manejo do lodo na agricultura. Esta análise não incluiu o valor de venda do lodo ou os lucros gerados nesse cenário. O foco desta seção foi exclusivamente calcular os custos atuais e as economias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises do lodo e do solo, as quais foram comparadas com as normas e resoluções CONAMA 498/2020, CETESB P4.230/2021 e MAPA IN 27/2006, o plano de aplicação do lodo na agricultura e a análise da viabilidade econômica.

5.1 Características do lodo

Considerando a disponibilidade do laudo de periculosidade (NBR 10004/2004) do lodo primário, o qual foi classificado como Classe II – não perigoso, para o lodo secundário foi adotada a mesma classificação. Tal consideração foi pautada no fato de que, a possível presença de substâncias químicas ou biológicas que conferisse periculosidade ao lodo, seria detectada nas análises de classificação do lodo primário.

Os resultados das análises e os valores máximos permitidos para lodo primário não perigoso são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Caracterização do lodo primário e Valores Máximos Permitidos, segundo o anexo F da ABNT NBR 10004:2004

				(continua)
Parâmetros	Unidade	Resultado	VMP - NBR 10004:2004	
pH	-	8,69	2,0 - 12,5	
Sulfeto	mg/kg	24,6	500	
Porcentagem de Sólidos	%	3,7	-	
Cianeto	mg/kg	ND	250	
Arsênio	mg/L	ND	1	
Bário	mg/L	0,047	70	
Cádmio	mg/L	ND	0,5	
Chumbo	mg/L	ND	1	
Cromo	mg/L	ND	5	
Fluoreto	mg/L	0,4	150	
Mercúrio	mg/L	ND	0,1	
Prata	mg/L	ND	5	
Selênio	mg/L	ND	1	
1,1-Dicloroetano	mg/L	ND	3	
1,2-Dicloroetano	mg/L	ND	1	
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	ND	7,5	
2,4,5-T	mg/L	ND	0,2	
2,4,5-TP	mg/L	ND	1	
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	ND	400	
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	ND	20	

Tabela 15 - Caracterização do lodo primário e Valores Máximos Permitidos, segundo o anexo F da ABNT NBR 10004:2004

Parâmetros	Unidade	Resultado	(conclusão)
			VMP - NBR 10004:2004
2,4-D	mg/L	ND	3
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	ND	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	ND	0,003
Benzeno	mg/L	ND	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	ND	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	ND	0,02
Cloreto de Vinila	mg/L	ND	0,5
Clorobenzeno	mg/L	ND	100
Clorofórmio	mg/L	ND	6
DDT	mg/L	ND	0,2
Endrin	mg/L	ND	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	ND	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	ND	0,5
Hexacloroetano	mg/L	ND	3
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,000642	200
Metoxicloro	mg/L	ND	2
Nitrobenzeno	mg/L	ND	2
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	ND	200
Pentaclorofenol	mg/L	ND	0,9
Piridina	mg/L	ND	5
Tetracloreto de Carbono	mg/L	ND	0,2
Tetracloroetano	mg/L	ND	4
Toxafeno	mg/L	ND	0,5
Tricloroetano	mg/L	ND	7
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	ND	0,003
Lindano (g-HCH)	mg/L	ND	0,2
Metiletilcetona (2-Butanona)	mg/L	ND	200

VMP = Valores Máximos Permitidos; ND = Não Detectado

Fonte: ABNT NBR 10004 (2004)

Assim, o lodo secundário foi adotado como não perigoso, partindo-se para a análise de teor de nutrientes, metais pesados e patógenos, para comparação com os parâmetros exigidos pelas normas e resoluções CONAMA 498/2020 e CETESB P4.230/2021 para verificar se atendia aos padrões para aplicação no solo.

Na Tabela 16 encontram-se os resultados obtidos e os valores máximos permitidos pela CETESB P4.230/2021 e pelo MAPA IN 27/2006.

Tabela 16 - Caracterização do lodo secundário e Valores Máximos Permitidos, determinados pela CETESB P4.230/2021 e pelo MAPA IN 27/2006

Parâmetros	Unidade	Resultado	VMP – CETESB P4.230/2021	VMP – MAPA IN 27/2006
pH	-	6,23	-	-
Sólidos Totais	%	45,3	-	-
Umidade	%	54,7	-	-
Sólidos Voláteis	%	37,9	-	-
Carbono Orgânico Total	%	37,8	-	-
Arsênio	mg/Kg	29,2	41	20
Bário	mg/Kg	99,3	1300	-
Cádmio	mg/Kg	ND	39	3
Chumbo	mg/Kg	3,18	300	150
Cobre	mg/Kg	29	1500	-
Cromo	mg/Kg	25,5	1000	2
Mercúrio	mg/Kg	0,0558	17	1
Molibdênio	mg/Kg	6,37	50	-
Níquel	mg/Kg	9,36	420	70
Selênio	mg/Kg	20,3	100	80
Zinco	mg/Kg	352	2800	-
Cálcio	mg/Kg	5130	-	-
Nitrogênio Amoniacal	mg/Kg	184	-	-
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg/Kg	10500	-	-
Nitrato	mg/Kg	ND	-	-
Nitrito	mg/Kg	ND	-	-
Magnésio	mg/Kg	540	-	-
Sódio	mg/Kg	662	-	-
Potássio	mg/Kg	288	-	-
Fósforo	mg/Kg	18900	-	-
Enxofre	%	ND	-	-
<i>Salmonellas</i>	P/A em 10g de MS	Ausentes	Ausência em 10 g de ST	Ausência em 10 g de ST
Ovos Viáveis de Helmintos	ovos/g de ST	ND	<0,25 ovo/g de ST	<0,25 ovo/g de ST
<i>Escherica Coli</i>	NMP/g ST	ND	10 ³ NMP/g de ST	10 ³ NMP/g de ST

VMP = Valores Máximos Permitidos; ND = Não Detectado; ST: Sólidos Totais; MS: Matéria Seca; NMP: Número Mais Provável

Fonte: CETESB (2021); BRASIL (2006)

Ao comparar os resultados obtidos com os valores máximos permitidos na CETESB P4.230/2021, constatou-se que todos os parâmetros limitantes estavam dentro dos limites estabelecidos. Além disso, verificou-se que o lodo possui nutrientes essenciais para as plantas, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu) e zinco (Zn).

Após essa análise inicial, os resultados foram comparados com outros estudos que utilizaram lodo industrial como fertilizante, como o de Mahapatra *et al.* (2013), que

também investigou o uso de lodo industrial. Nesta comparação, observou-se que os parâmetros N, P, K, Cu, Zn e C_{Orgânico} no lodo analisado aqui estão acima dos valores identificados por Mahapatra, o que é positivo, já que esses elementos são essenciais para o crescimento das plantas. Quanto os metais pesados, verificou-se que Pb, Cr e Ni também excedem os valores encontrados, embora ainda estejam dentro dos limites normativos. Essa diferença pode ser atribuída à origem do lodo: enquanto o lodo estudado por Mahapatra provém de uma indústria de alimentos, o lodo aqui analisado é proveniente de uma indústria de compósitos.

O lodo secundário foi também comparado com o estudo de Pereira (2015), que investigou um lodo originado em uma indústria de alimentos. Na comparação dos resultados dos parâmetros benéficos para o solo, constatou-se que os níveis de C_{Orgânico}, P e Zn estão acima dos encontrados por Pereira, enquanto os de N, K, Ca e Cu estão abaixo. Isso pode ser atribuído possivelmente ao efluente tratado na indústria de alimentos em questão ser uma combinação de efluente doméstico e industrial, enquanto a Fábrica estudada é exclusivamente industrial. Quanto aos metais pesados, verificou-se que os teores de Ba, Pb, Cr, Hg e Ni estão inferiores, enquanto os de As, Mo e Se estão superiores aos encontrados por Pereira, embora ainda estejam dentro dos limites normativos.

Adicionalmente, o lodo foi comparado com características do fertilizante orgânico composto produzido na ETE Jundiaí/Sp (Bittencourt *et al.* 2022). Nesta comparação, observou-se que os teores de K, Ca e Cu apresentaram-se significativamente menores, enquanto os níveis de N, P e Zn, também importantes para a fertilidade do solo, estão ligeiramente mais elevados no lodo de Jundiaí. Quanto aos metais pesados, apenas os teores de As e Se apresentaram valores superiores aos do lodo de Jundiaí.

A partir destas análises, foi possível concluir que o lodo investigado possui uma quantidade significativa de nutrientes quando comparado com outros lodos, com potencial para ser aplicado como fertilizante na agricultura.

Os parâmetros microbiológicos, como previsto devido à origem exclusivamente industrial do lodo, mostraram-se ausentes ou não foram detectados, demonstrando conformidade com as normativas vigentes.

Ao analisar o parâmetro Arsênio (As), verificou-se que ele ultrapassou o valor máximo permitido pelo MAPA IN 27/2006.

Diante desse resultado, foi realizado um processo de revisão do histórico de análises dos lodos primário e secundário, bem como dos efluentes brutos no tanque de equalização, referentes aos anos de 2022 e 2023, os quais foram analisados mensalmente. Nenhuma dessas amostras apresentou a presença significativa desse contaminante. O Anexo B – Resultados das análises mensais de Arsênio (As) no tanque de equalização (efluente bruto) do documento apresenta detalhadamente as análises do efluente bruto, especificamente em relação ao parâmetro As, que confirmam esta afirmação.

Além disso, foi realizada uma verificação junto ao setor responsável pelas compras de matérias-primas, o qual afirmou que, de acordo com a norma interna da empresa, é proibida a aquisição de materiais que contenham Arsênio. Dessa forma, concluiu-se que deve ter havido alguma contaminação da amostra no laboratório que interferiu no resultado da análise.

Nesse contexto, foi solicitado ao laboratório responsável que refizesse as análises do arsênio para o lodo.

A segunda análise, conforme esperado, apresentou um resultado muito inferior ao anterior, sendo de 5,49 mg/kg. Este novo resultado está de acordo com a Instrução Normativa do MAPA 27/2006 e confirma a possibilidade de utilização do lodo secundário na agricultura.

Em seguida, foi calculada a taxa de estabilização do lodo, usando a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais, conforme orientações da CONAMA 498/2020 e da CETESB P4.230/2021. O resultado foi uma taxa de 0,83, superior aos valores permitidos por estas normativas, que são de 0,65 e 0,7, respectivamente.

O grau de estabilização do lodo determina sua adequação para uso na agricultura. Um lodo não estabilizado pode desencadear uma decomposição contínua após sua aplicação no solo, resultando na liberação de gases e compostos orgânicos voláteis, o que gera odores desagradáveis e atrai vetores. Além disso, durante o processo de decomposição, microrganismos presentes no lodo consomem nutrientes como nitrogênio e fósforo, que quando aplicado em culturas agrícolas pode afetar temporariamente a disponibilidade desses nutrientes para as plantas, até que o lodo seja completamente decomposto e seus nutrientes sejam reincorporados ao solo.

Dessa forma, esse resultado indica que o lodo ainda possui matéria orgânica fresca e atividade biológica, possivelmente devido à falta de um procedimento

padronizado para o manejo do lodo, o que permitiu uma mistura de lodos novos e velhos.

Apesar da taxa de estabilização elevada, o plano de aplicação do lodo prosseguiu-se com o plano de aplicação, assumindo que este parâmetro poderia ser corrigido facilmente adotando procedimentos internos de manejo do lodo como, por exemplo, com uma maior permanência do mesmo nos leitos de secagem, permitindo uma maior estabilização do lodo.

A partir deste ponto do trabalho, o material anteriormente referido como "lodo" será denominado "biossólido". Essa mudança de terminologia se deve ao fato de que o material atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos na CONAMA 498/2020 e na CETESB P4.230/2021, tornando-o apto para aplicação em solos.

5.2 Características do Solo Teste 1 e do Solo Teste 2

Na caracterização do Solo Teste 1 foram analisados o pH, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn), sulfato, alumínio trocável (Al), matéria orgânica, acidez potencial (H+Al), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases (V), Soma das Bases (SB), e metais pesados, incluindo arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e selênio (Se). Os resultados das substâncias de interesse foram comparados com o Valor de Prevenção (VP) estabelecidos pela CETESB DD 125/2021 de acordo com a orientação da CETESB P4.230/2021.

A Tabela 17 apresenta os dados da caracterização do Solo Teste 1.

Tabela 17 - Caracterização do Solo Teste 1 e Valor de Prevenção, determinado pela Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E da CETESB

				(continua)
Parâmetro	Unidade	Resultado	VP - CETESB DD 125/2021	
Potássio	mmolc/kg	2	-	
Fósforo	mg/kg	10	-	
Cálcio	mmolc/kg	20	-	
Magnésio	mmolc/kg	6	-	
Sulfato	mg/kg	40,82	-	
Saturação por Bases (V)	%	54	-	
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	mmolc/kg	52	-	
Soma das Bases (SB)	mmolc/kg	28	-	

Tabela 17 - Caracterização do Solo Teste 1 e Valor de Prevenção, determinado pela Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E da CETESB

Parâmetro	Unidade	Resultado	(conclusão)
			VP - CETESB DD 125/2021
Alumínio trocável (Al^{3+})	mmolc/kg	0	-
Acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}^{3+}$)	mmolc/kg	24	-
pH	-	5,4	-
Matéria orgânica	g/kg	11	-
Arsênio	mg/kg	ND	15
Bário	mg/kg	3,52	120
Cádmio	mg/kg	ND	1,3
Chumbo	mg/kg	ND	72
Cobre	mg/kg	13,99	60
Cromo	mg/kg	ND	75
Mercúrio	mg/kg	0,38	0,5
Níquel	mg/kg	ND	30
Selênio	mg/kg	ND	1,2
Zinco	mg/kg	11,9	86

VP: Valor de Prevenção; ND = Não Detectado.

Fonte: CETESB (2021)

Obtendo-se os resultados do Solo Teste 1 foi possível classificá-los segundo as classes de teores recomendados do Boletim Técnico 100 do IAC de Carantella *et al.* (2022). Os parâmetros pH e Saturação por bases (V%) foram classificados como médios por ambas estarem entre 5,1 e 5,5 e 50 e 70%, respectivamente. Em relação a Saturação por Bases, de acordo com Ronquim (2010), pesquisador da Embrapa, os solos são classificados como solos eutróficos (férteis) se o V% for igual ou superior a 50% e solos distróficos (pouco férteis) se o V% for menor que 50%. De acordo com essa classificação, o Solo Teste 1 foi designado como fértil devido à sua saturação por bases de 54%.

Seguindo com a interpretação de Carantella *et al.* (2022), o P foi classificado como baixo por ser estar entre 5 e 15 mg/kg, e o K e o Mg foram classificados como médios por estarem entre 1,6 e 3 mmolc/kg e 5 e 8 mmolc/kg, respectivamente.

Os micronutrientes Cu e Zn foram classificados como altos por apresentarem concentrações acima de 5 e 10 mg/kg, respectivamente.

Os metais pesados detectados, Ba e Hg, foram comparados com a CETESB DD 125/2021 e ambos estão abaixo do valor de prevenção por seus resultados não ultrapassarem os limites de 120 e 0,5 mg/kg respectivamente, podendo ser utilizado para aplicação de lodo.

Com base na interpretação dos resultados, observou-se que o Solo Teste 1 apresenta níveis satisfatórios de micronutrientes e K, mas é deficiente nos outros macronutrientes. Portanto, é viável aumentar a disponibilidade de P no solo por meio da aplicação do lodo, complementando os fertilizantes minerais a serem utilizados.

A caracterização do Solo Teste 2 foi obtida através do estudo de Chiba (2005). Nesta caracterização foram analisados o pH, os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), alumínio trocável (Al), matéria orgânica, acidez potencial (H+Al), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases (V), Soma das Bases (SB), e metais pesados, incluindo cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr) e níquel (Ni). Os resultados das substâncias de interesse foram comparados com o Valor de Prevenção (VP) estabelecidos pela CETESB DD 125/2021 de acordo com a orientação da CETESB P4.230/2021.

A tabela 18 apresenta os dados da caracterização do Solo Teste 2.

Tabela 18 - Caracterização do Solo Teste 2 e Valor de Prevenção, determinado pela Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E da CETESB

Parâmetro	Unidade	Resultado	VP – CETESB DD 125/2021
Potássio	mmolc/kg	0,3	-
Fósforo	mg/kg	4,5	-
Cálcio	mmolc/kg	24	-
Magnésio	mmolc/kg	12	-
Ferro	mg/kg	19,16	-
Manganês	mg/kg	7,82	-
Saturação por Bases (V)	%	50	-
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	mmolc/kg	25	-
Soma das Bases (SB)	mmolc/kg	18	-
Alumínio trocável (Al ³⁺)	mmolc/kg	2	-
Acidez potencial (H+Al ³⁺)	mmolc/kg	11,25	-
pH	-	5,7	-
Matéria orgânica	mg/kg	8,19	-
Cádmio	mg/kg	0,5	1,3
Chumbo	mg/kg	4,95	72
Cobre	mg/kg	0,19	60
Cromo	mg/kg	3,78	75
Níquel	mg/kg	2,11	30
Zinco	mg/kg	0,72	86

VP: Valor de Prevenção; ND = Não Detectado.

Fonte: CETESB (2021); Chiba (2005)

Os resultados do Solo Teste 2, assim como os do Solo Teste 1, foram classificados segundo as classes de teores recomendados pelo Boletim Técnico 100 do IAC de Carantella *et al.* (2022). O pH foi classificado como baixo, por estar entre 5,6 e 6; a Saturação por Bases (V%) foi classificada como média por estar entre 50 e 70%. Em relação a Saturação por Bases, o Solo Teste 2 foi designado como fértil devido à sua saturação por bases ser de 50% (Ronquim, 2010).

Seguindo com a interpretação de Carantella *et al.* (2022), P foi classificado como muito baixo por ser menor que 5 mg/kg; o K foi classificado como baixo por ser menor que 1,6 mmol/kg; e o Mg foi classificado como alto por ser maior que 8 mmolc/kg.

É importante ressaltar que este solo foi corrigido com calcário dolomítico antes das análises, o que certamente contribuiu para a melhoria do pH e do Mg. Já que o calcário atua como corretivo de solo, ajudando a neutralizar a acidez do solo e a elevar o pH, e fornece cálcio e magnésio (Resende; Botrel; Alvim, 2021).

Os micronutrientes Cu, Zn, Fe e Mn também foram classificados segundo Carantella *et al.* (2022). O Cu e o Zn, foram classificados como baixo, por apresentarem concentrações abaixo de 2 e 5 mg/kg, respectivamente; o Fe foi classificado como alto, por apresentar concentração acima de 12 mg/kg; e o Mn foi classificado como médio, por apresentar concentração entre 5 e 10 mg/kg.

Os metais pesados foram comparados com a CETESB DD 125/2021 e todos estão abaixo do valor de prevenção, podendo ser utilizado para aplicação de lodo.

Com base na interpretação dos resultados, observou-se que o Solo Teste 2 apresenta níveis satisfatórios de pH, Mg, Mn e Fe, mas é deficiente nos macronutrientes essenciais P e K. Portanto, é viável utilizá-lo para simular a aplicação do lodo, já que não houve interferência de fertilizantes minerais ou orgânicos.

Além das avaliações individuais, uma comparação entre os resultados do Solo Teste 1 e do Solo Teste 2 revelou níveis mais elevados de micronutrientes e K no Solo Teste 1. Essa diferença sugere uma possível interferência de fertilizantes, especialmente vinhaça, considerando que o solo em questão é destinado ao cultivo de cana-de-açúcar. Tal observação é relevante, pois em solos tropicais, os teores de potássio geralmente são baixos (BRASIL, 2016).

Segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (BRASIL, 2016) o potássio é o elemento mineral predominante na vinhaça e, em relação aos micronutrientes, o ferro aparece em maior concentração, seguido do manganês, cobre e zinco.

Na Tabela 19 apresenta-se a composição química média da vinhaça proveniente da produção do álcool a partir do melaço* (mel residual da fabricação do açúcar), do caldo de cana e do misto, em que é confirmada a predominância de K para todos os tipos.

Tabela 19 - Composição química média da vinhaça proveniente da produção do álcool a partir do melaço, do caldo de cana e do misto

Parâmetro	Unidade	Melaço*	Caldo	Misto
pH	-	4,2 - 5	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Nitrogênio	mg/L	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
Fósforo	mg/L	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio	mg/L	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
Cálcio	mg/L	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio	mg/L	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato	mg/L	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Matéria Orgânica	mg/L	63.400	19.500	3.800

Melaço*: subproduto resultante da etapa de centrifugação, no processo de fabricação de açúcar. É utilizado para produção de álcool, em especial o etanol, como matéria-prima para fabricar cachaça, rum entre outros produtos.

Fonte: Adaptado de BRASIL (2016)

Após analisar a caracterização do Solo Teste 1 e da vinhaça, constatou-se uma correlação significativa com os níveis de K e possivelmente com o pH, dado que a vinhaça apresenta um pH baixo, o que pode ter contribuído para o pH igualmente baixo do Solo Teste 1. A presença de matéria orgânica também pode ter influenciado, uma vez que esta foi menor no Solo Teste 2. Além disso, o teor de Mg pode ter tido influência, visto que foi alto no Solo Teste 2 devido à intervenção do calcário, enquanto no Solo Teste 1, que até então era considerado como não alterado, foi de médio teor. A disponibilidade de P também pode ter sido afetada, pois foi muito baixa no Solo Teste 2 e apenas baixa no Solo Teste 1.

Com base nessas análises, foi possível concluir que o Solo Teste 1 provavelmente foi alterado pela presença de vinhaça. Entretanto, isso não impede o cálculo da taxa de aplicação do biofertilizante, pois o Solo Teste 1 ainda atende aos requisitos estabelecidos pela CETESB DD 125/2021. Portanto, com os dados dos solos em mãos, foi possível elaborar o plano de aplicação para ambos os solos, seguindo as diretrizes estabelecidas pelo CONAMA 498/2020 e pela CETESB P4.230/2021.

5.3 Plano de aplicação do lodo na agricultura

Os resultados obtidos a partir dos cálculos realizados na seção 4.7 Plano de aplicação do lodo na agricultura são apresentados nesta seção, fornecendo detalhes sobre as quantidades de biossólido a serem aplicadas e os limites máximos de substâncias a serem acrescentadas ao Solo Teste 1 e ao Solo Teste 2. Além da apresentação dos resultados, cada aspecto foi analisado e comparado com as diretrizes ambientais CONAMA 498/2020 e CETESB P4.230/2021.

A primeira etapa do plano de aplicação do lodo na agricultura, visando complementar a adubação no cultivo de cana-de-açúcar no Solo Teste 1 e no Solo Teste 2, envolveu o cálculo da taxa de aplicação do biossólido para atender às demandas nutricionais da cultura. Essa análise levou em consideração os macronutrientes potássio (K), fósforo (P), nitrogênio (N), e os micronutrientes, cobre (Cu) e zinco (Zn), os quais foram identificados no biossólido como relevantes para a agricultura. As fórmulas utilizadas para o cálculo, assim como as recomendações para cada um dos nutrientes, foram apresentadas na seção 4.7 Plano de aplicação do lodo na agricultura. Conforme mencionado anteriormente, essa taxa representa a quantidade de biossólido requerida para substituir os fertilizantes minerais no Solo Teste 1 e no Solo Teste 2 para o cultivo de cana-de-açúcar.

A Tabela 20 apresenta a taxa de aplicação calculada para cada macronutriente e micronutriente identificados no biossólido considerados relevantes para a agricultura no Solo Teste 1. Essa determinação leva em conta uma produtividade esperada de mais de 170 toneladas por hectare e as recomendações de adubação do Boletim 100 do IAC (Carantella *et al.*, 2022).

Tabela 20 - Taxa de aplicação do biossólido para o Solo Teste 1, determinada segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Parâmetro	Produtividade esperada [t/ha]	Recomendação IAC [kg/ha]	Disponível no solo [kg/ha]	Disponível no lodo [kg/t]	Taxa de aplicação [t/ha]
Nitrogênio	> 170	30	-	10,32	9,41
Fósforo	> 170	200	26	18,90	9,21
Potássio	> 170	180	203,32	0,29	-81
Cobre	> 170	0	36,37	0,03	-1254,3
Zinco	> 170	2	30,94	0,35	-82

Fonte: Carantella *et al.* (2022); Autora (2024)

A taxa de aplicação do biofóssido no Solo Teste 1 foi determinada com base nos resultados da caracterização do solo, da caracterização do biofóssido e das recomendações do IAC (Carantella *et al.*, 2022). Os dados indicam que o Solo Teste 1 demanda de suplementação de N e P. Contudo, as diretrizes da CETESB P4.230/2021 estabelecem que a taxa de aplicação calculada só pode ser efetivamente utilizada se estiver dentro das necessidades da cultura. Os valores negativos relativos a K, Cu e Zn revelam que o Solo Teste 1 já possui quantidades adequadas desses nutrientes, e aplicá-los resultaria em excesso para a cultura da cana-de-açúcar. Portanto, não é viável aplicar o biofóssido nesta área, uma vez que não é possível separar seletivamente as quantidades de N e P.

Além disso, conforme discutido anteriormente, o Solo Teste 1 já apresenta níveis adequados desses nutrientes devido à fertirrigação com vinhaça, o que demonstra o impacto desse método no solo e evidência a incompatibilidade da aplicação simultânea de biofóssido.

A taxa de aplicação do biofóssido também foi calculada para o Solo Teste 2. A Tabela 21 apresenta a taxa de aplicação calculada para cada macronutriente e micronutriente identificados no biofóssido. Essa determinação leva em conta os mesmos parâmetros do Solo Teste 1.

Tabela 21 - Taxa de aplicação do biofóssido para o Solo Teste 2, determinada segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Parâmetro	Produtividade esperada [t/ha]	Recomendação IAC [kg/ha]	Disponível no solo [kg/ha]	Disponível no lodo [kg/t]	Taxa de aplicação [t/ha]
Nitrogênio	> 170	30	-	10,32	9,40
Fósforo	> 170	200	11,7	18,90	9,96
Potássio	> 170	220	30,50	0,29	657,99
Cobre	> 170	5	0,49	0,03	155,38
Zinco	> 170	5	1,87	0,35	8,89

Fonte: Carantella *et al.* (2022); Autora (2024)

A determinação da taxa de aplicação do biofóssido no Solo Teste 2 foi realizada considerando os resultados da caracterização do solo, a caracterização do biofóssido e as recomendações do IAC (Carantella *et al.*, 2022). Os dados revelam que o Solo Teste 2 necessita de suplementação em todos os parâmetros analisados, conforme esperado com base nas interpretações anteriores. Apesar da necessidade significativa de aplicação para o K, o estudo seguiu direcionado pela taxa de aplicação

de Zn, uma vez que este nutriente está presente em maiores quantidades no solo em comparação com os outros nutrientes, o que limita a aplicação do biofósforo conforme as diretrizes da CETESB P4.230/2021. Estes resultados relevam que para a aplicação do biofósforo ser viável e legal, é necessário que o solo não tenha interferência de outros tipos de fertilizante.

Mahapatra *et al.* (2013) conduziram um estudo aplicando quantidades de 10 a 50 t/ha e concluíram que 30 t/ha eram suficientes para o cultivo de *Trigonella foenum graecum* (feno-grego), observando que quantidades superiores eram prejudiciais para a produtividade da cultura.

Chiba (2005) calculou a taxa de aplicação com base nos valores de nitrogênio, resultando em 8 t/ha. Ele observou que esta quantidade aumentou as quantidades de nutrientes no solo e melhorou as condições de fertilidade.

Pereira (2015) aplicou diferentes quantidades de lodo em quatro áreas de cultivo de eucalipto, variando de 26 a 147 t/ha, e observou melhoras nas condições de fertilidade do solo, como o aumento da saturação por bases, soma de bases, CTC, matéria orgânica, além da redução do alumínio trocável e da saturação por alumínio, sem identificar uma taxa como a mais adequada.

Silva (2018) calculou a taxa de aplicação com base nos valores de nitrogênio, resultando em 6 t/ha e observou que o solo apresentou melhores condições de fertilidade, como disponibilidade de nutrientes e aumento da CTC. Em seu experimento, ele aplicou até 8 vezes essa quantidade e concluiu que uma aplicação entre 4 e 8 vezes é a necessária para obter os melhores resultados na maturação da cana-de-açúcar.

Com base nessas pesquisas, conclui-se que as taxas de aplicação calculadas neste estudo são apropriadas e seguras para o manejo do solo, e podem melhorar as condições de fertilidade. Para garantir que essa quantidade trará bons resultados para a cana-de-açúcar, serão necessárias análises e monitoramentos específicos. Além disso, todos os estudos indicaram que o lodo não adicionou quantidades significativas de metais pesados ao solo ou às culturas.

Com as taxas de aplicação calculadas para o Solo Teste 2, a segunda etapa do plano envolveu o cálculo do Teor de Referência no Solo (TRS), conforme a fórmula descrita na seção 4.7 Plano de aplicação do lodo na agricultura. Essa fórmula foi aplicada para todas as substâncias químicas relevantes, e os resultados foram comparados com os valores máximos de aporte (VMA) permitidos no solo para a

aplicação de bioossólidos. O TRS representa a quantidade de substâncias químicas presentes no solo por hectare, e sua fórmula é uma conversão dos teores identificados na caracterização do solo, expressos em mg/kg, para kg/ha.

A Tabela 22 apresenta os teores de referência de cada substância química, comparados aos valores máximos de aporte admissíveis no solo, conforme determinado pela CETESB P4.230/2021.

Tabela 22 - Teor de referência das substâncias químicas de interesse no solo e valores máximos de aporte, determinado segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Parâmetro	TS [mg/kg]	TRS [kg/ha]	VMA [kg/ha] - CETESB P4.230/2021
Cádmio	0,5	1,3	3,3
Chumbo	4,95	12,87	187
Cobre	0,19	0,49	156
Cromo	3,78	9,83	195
Níquel	2,11	5,49	78
Zinco	0,72	1,87	223

TS: Teor da substância no solo; TRS: Teor de referência no solo; VMA: Valores máximos admissíveis.

Fonte: Chiba (2005); CETESB (2021); Autora (2024).

O TRS foi comparado com o VMA, constatando-se que todos os valores estão abaixo dos limites estabelecidos. O Cd apresentou um valor mais expressivo e pode requerer atenção futura, porém também ficou abaixo de seu respectivo limite VMA. De acordo com as diretrizes da CETESB P4.230/2021, caso o TRS de todas as substâncias químicas de interesse seja inferior ao respectivo VMA, o plano pode prosseguir. Sendo assim, avançou-se para a terceira etapa, que envolveu o cálculo do valor do Aporte Teórico (AT) e do valor do Aporte Possível (AP) para cada uma das substâncias químicas de interesse.

Os cálculos foram realizados de acordo com as fórmulas estabelecidas na seção 4.7 Plano de aplicação de lodo na agricultura. Nessa determinação, considerou-se a taxa de aplicação do bioossólido para o Zn, conforme a orientação da CETESB P4.230/2021 de utilizar o menor valor calculado, o teor da substância química de interesse no lodo, o VMA e o TRS. Os resultados do AT e do AP são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Valor do aporte teórico e valor de aporte possível para cada uma das substâncias de interesse, determinado segundo a Norma Técnica P 4.230/2021 da CETESB

Parâmetro	TA [t/ha]	T [mg/kg]	VMA [kg/ha] - CETESB P4.230/2021	TRS [kg/ha]	AT [kg/ha]	AP [kg/ha]
Arsênio	8,89	5,49	39	-	0,05	-
Bário	8,89	99,3	312	-	0,88	-
Cádmio	8,89	ND	3,3	1,3	0,00	2
Chumbo	8,89	3,18	187	12,87	0,03	174,13
Cobre	8,89	29	156	0,49	0,26	155,51
Cromo	8,89	25,5	195	9,83	0,23	185,17
Mercúrio	8,89	0,06	1,3	-	0,00	-
Molibdênio	8,89	6,37	13	-	0,06	-
Níquel	8,89	9,36	78	5,49	0,08	72,51
Selênio	8,89	20,3	3,1	-	0,18	-
Zinco	8,89	352	223	1,87	3,13	221,13

TA: Taxa de aplicação; T: Teor da substância química de interesse no lodo; VMA: Valores máximos admissíveis; TRS: Teor de referência no solo; AT: Aporte Teórico; AP: Aporte Possível.

Fonte: CETESB (2021); Autora (2024).

Comparando os resultados de AT e AP, verificou-se que o AT de todas as substâncias químicas de interesse é inferior a 80% do respectivo AP para todas as substâncias. Isso indica que o biossólido pode ser aplicado.

Pereira (2015), que em seu estudo chegou a aplicar 147 t/ha de lodo, também calculou a quantidade total teórica de cada constituinte adicionado ao solo via lodo (AT). Ela constatou que todos os componentes analisados resultaram em valores abaixo dos limites máximos determinados pela Resolução CONAMA 375/2006, antiga versão da CONAMA 498/2020.

5.4 Viabilidade econômica

Os resultados da análise da viabilidade econômica realizada no contexto deste estudo serão abordados a seguir. Devido ao Solo Teste 1 ter quantidades suficientes de nutrientes, a viabilidade econômica foi feita considerando apenas o Solo Teste 2.

Todos os cálculos foram conduzidos de acordo com as fórmulas previamente elaboradas e descritas na seção 4.8 Viabilidade econômica. Os dados apresentados ofereceram uma perspectiva detalhada sobre os custos e benefícios associados ao transporte do lodo até uma distância limite, em comparação com os gastos de deposição em aterros sanitários.

Além disso, foram examinados os custos projetados relacionados à aquisição de fertilizantes para adubar o solo. Essa análise pretendeu fornecer informações fundamentais para embasar decisões estratégicas e sustentáveis na gestão de resíduos.

O valor cobrado pela Prefeitura de Rio Claro para dispor o resíduo no aterro sanitário municipal é de R\$134,43 por tonelada e o valor do transporte para o aterro sanitário municipal cobrado pela empresa terceira é de R\$ 20,00 por tonelada, mais o valor do aluguel da unidade da caçamba com capacidade de 20 toneladas que é de R\$420,00. Com base na quantidade média de 20 toneladas/mês de lodo enviada para o aterro sanitário municipal, para o cálculo do custo associado ao descarte por mês foi considerado apenas 1 unidade de caçamba.

A Tabela 24 apresenta os custos associados ao descarte do lodo em aterro sanitário (CL) por mês, considerando o peso do lodo de 20 toneladas (peso máximo por caçamba), o valor do aluguel da caçamba e o valor cobrado pela Prefeitura.

Tabela 24 - Custos associados ao descarte do lodo em aterro sanitário

ASM [R\$/t]	PL [t/mês]	T [R\$/t]	Caçamba [R\$/un]	CL [R\$/mês]
134,43	20	20	420	3508,60

ASM: Valor cobrado pela Prefeitura de Rio Claro; PL: Peso do lodo descartado; T: Valor transporte cobrado pela empresa terceira; CL: Custo atual do lodo para dispor no aterro sanitário municipal.

Fonte: Autora (2024)

Conforme apresentado na Tabela 24, o custo para dispor 20 toneladas de lodo por mês no aterro sanitário municipal é de R\$3508,60, totalizando R\$42.103,20 por ano.

Além dos custos relacionados ao aterro, também foram analisados o custo do fertilizante mineral para adubação do Solo Teste 2.

O preço de cada tonelada destes fertilizantes e a quantidade deles recomendada, segundo Carantella *et al.* (2022), para a cultura de cana-de-açúcar para uma produtividade esperada de mais de 170 t/ha, é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Preço dos fertilizantes NPK e quantidade recomendada para a cultura de cana-de-açúcar, segundo Boletim Técnico 100 do IAC

Fertilizante	Preço [R\$/t]	Quant. Recomendada [t/ha]
Ureia (Nitrogênio)	1673,72	0,03
Fosfato Monoamônico (Fósforo)	2935,50	0,20
Cloreto de Potássio (Potássio)	1622,25	0,22

Quant. Recomendada: Quantidade Recomendada.

Fonte: Veloso (2024); Carantella *et al.* (2022)

De acordo com o Boletim Técnico 100 do IAC (Carantella *et al.*, 2022) será necessário aplicar 0,03 toneladas de N por hectare, 0,02 toneladas de P por hectare e 0,22 toneladas de K por hectare no Solo Teste 2.

Com base nestes valores o cálculo do custo de cada fertilizante por hectare foi calculado. A Tabela 26 apresenta os custos de cada fertilizante para cada hectare cultivado.

Tabela 26 - Preço dos fertilizantes NPK por hectare cultivado com cana-de-açúcar

Fertilizante	Preço [R\$/ha]
Ureia (Nitrogênio)	50,21
Fosfato Monoamônico (Fósforo)	587,10
Cloreto de Potássio (Potássio)	356,90

Fonte: Autora (2024)

Com base nos resultados apresentados na tabela, o preço total dos fertilizantes NPK por hectare cultivado com cana-de-açúcar é de R\$994,21. Esses resultados serviram como base para os cálculos da economia feitos posteriormente.

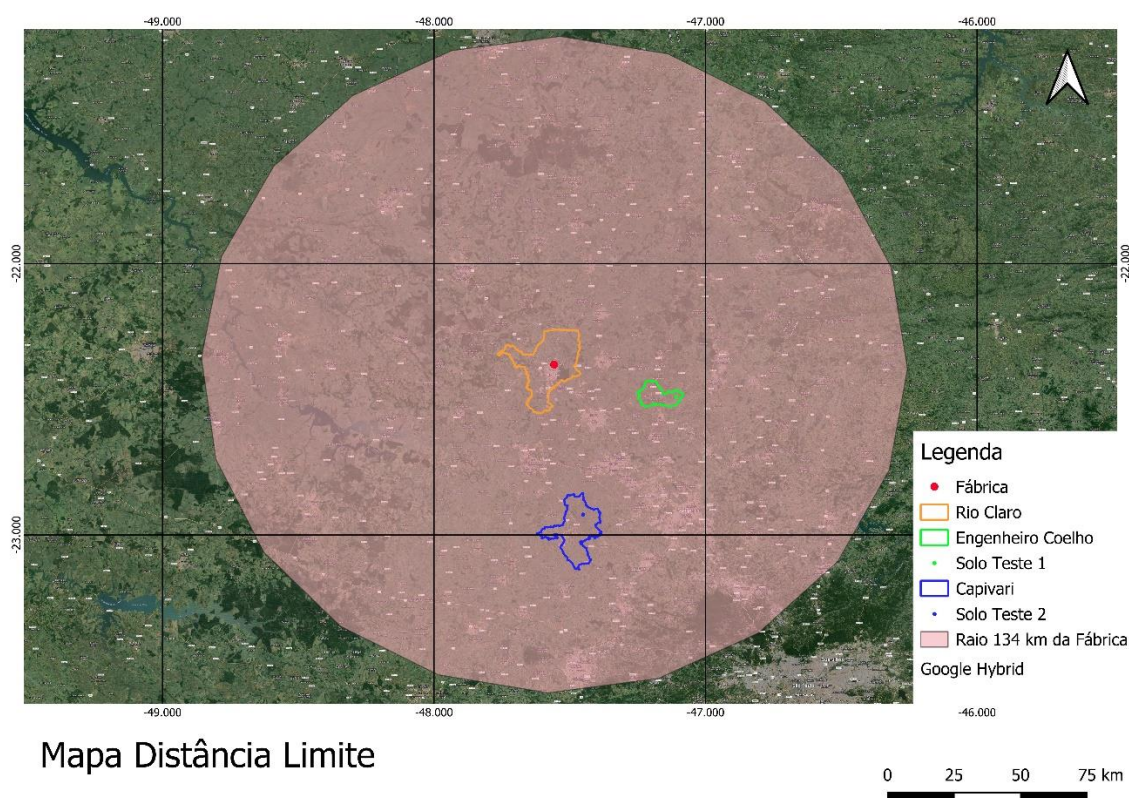
Após efetuar os cálculos de todos os custos envolvidos, tanto para a disposição do lodo no aterro sanitário municipal quanto para o custo de adubação por hectare, foi calculado a distância limite, utilizando a fórmula mencionada na seção 4.8 Viabilidade econômica. Este cálculo considerou o custo atual do lodo para dispor no aterro sanitário municipal de R\$3.508,60 e o valor do transporte para outras localidades, incluindo o caminhão e o motorista, cobrado pela empresa terceira atualmente responsável pelo transporte de resíduos da Fábrica. Conforme informado por essa empresa, o custo do transporte do resíduo é de R\$13,00 por quilômetro percorrido, considerando uma carga de até 20 toneladas.

Este cálculo resultou em uma distância de até 134 km/mês, considerando o percurso de volta. Ou seja, com o custo atual para dispor o lodo no aterro sanitário

municipal é possível transportar o biossólido até 134 km sem ter nenhum custo adicional.

A Figura 12 apresenta o raio de 134km a partir da Fábrica.

Figura 12 - Distância limite para o transporte do biossólido, com a delimitação do raio, a delimitação de Engenheiro Coelho/SP (linha verde), a delimitação de Capivari/SP (linha azul), a delimitação de Rio Claro/SP (linha amarela) e a localização da Fábrica (ponto vermelho)



Fonte: Imagem extraída do Software Google Earth® (2024)

Ao observar a imagem, constatou-se que a distância limite calculada é significativa, abrangendo vários municípios da região que podem conter áreas agrícolas aptas para receber a aplicação de biossólido, inclusive os municípios do Solo Teste 1 e do Solo Teste 2.

Após a delimitação do raio de distância para o transporte do biossólido, foi realizado o cálculo para definir a quantidade em porcentagem que a menor taxa de aplicação do biossólido (8,89 t/ha; Tabela 21) pode suprir das taxas de aplicação do biossólido calculadas para o N, P e K conforme a Tabela 21.

A Tabela 27 apresenta os resultados deste cálculo.

Tabela 27 - Quantidade em porcentagem que a menor taxa de aplicação do biossólido pode suprir das taxas de aplicação do biossólido calculadas para os NPK

Fertilizante	Taxa de Aplicação [t/ha]	Menor taxa de aplicação [t/ha]	Quant. Lodo [%]
Ureia (Nitrogênio)	9,40	8,89	94,57%
Fosfato Monoamônico (Fósforo)	9,96	8,89	89,23%
Cloreto de Potássio (Potássio)	657,99	8,89	1,35%

Fonte: Autora (2024)

A partir deste cálculo e da análise da Tabela 27, verificou-se que o biossólido pode suprir quantidades significativas das demandas de fertilizantes. O biossólido pode atender a 95% da quantidade recomendada de N e 90% da quantidade recomendada de P. No entanto, o K é o único nutriente que o biossólido não suprirá adequadamente, devido à sua baixa concentração nesse nutriente.

Adicionalmente, foram calculadas as economias decorrentes da decisão de utilizar o biossólido como fertilizante, em vez de fertilizantes minerais. Considerando a quantidade recomendada de fertilizantes minerais, o custo atual do fertilizante e a quantidade de nutrientes que o biossólido pode suprir aplicando 8,89 t/ha.

A Tabela 28 apresenta as economias previstas.

Tabela 28 - Quantidade que o biossólido pode suprir de nutrientes e economia gerada ao optar por utilizá-lo como fertilizante

Fertilizante	Preço [R\$/ha]	Quant. Lodo [%]	Economia [R\$]
Ureia (Nitrogênio)	50,21	94,57%	47,49
Fosfato Monoamônico (Fósforo)	587,10	89,23%	523,87
Cloreto de Potássio (Potássio)	356,90	1,35%	4,82

Fonte: Autora (2024)

Ao analisar a tabela, verificou-se que a utilização do biossólido como fertilizante irá resultar em uma economia significativa com os fertilizantes minerais. A economia em reais será de R\$47,49 por hectare de N, R\$523,87 por hectare de P e R\$4,82 por hectare de K. Ou seja, o proprietário economizará R\$576,18 (58%) por hectare ao utilizar biossólido em vez de fertilizante mineral.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados pode-se concluir que:

- Os estudos desenvolvidos neste trabalho indicaram que os resultados da caracterização do lodo secundário gerado pelo sistema de tratamento de águas residuárias em uma indústria de compósitos atende a todos os valores limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 498/2020, Norma Técnica CETESB P4.230/2021 e da Instrução Normativa MAPA 27/2006.
- O lodo apresentou quantidades importantes de nutrientes essenciais para a agricultura, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu) e zinco (Zn).
- A taxa de estabilização do lodo foi superior ao exigido para a Norma Técnica CETESB P4.230/2021, possivelmente por conta da falta de um procedimento para o manejo adequado do lodo que permitiu a mistura de materiais novos e velhos. Portanto, ressalva-se que devem ser estabelecidos procedimentos para melhorar a estabilidade do lodo, mantendo-o por mais tempo nos leitos de secagem sem interferência de outros materiais para melhorar o grau de estabilização;
- Devido aos parâmetros do material atenderem aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos na Resolução da CONAMA 498/2020 e na Norma Técnica da CETESB P4.230/2021, o lodo foi renomeado no trabalho como “biossólido”;
- Em relação aos solos selecionados, o primeiro solo, denominado Solo Teste 1, apresentou quantidades adequadas de K e micronutrientes, possivelmente causado por fertilizantes solúveis e fertirrigação de vinhaça na área. Por este motivo não foi possível realizar o plano de aplicação de lodo neste solo;
- O solo denominado “Solo Teste 2” apresentou baixas quantidades de nutrientes e para ele foi realizado o plano de aplicação. O biossólido poderá suprir em 100% a quantidade recomendada de Zn para o cultivo de cana-de-açúcar, 95% da quantidade recomendada de N e 90% da quantidade recomendada de P. Além disso, a verificação de substâncias químicas revelou que o biossólido acrescentará ao solo quantidades dessas substâncias muito inferiores ao limite possível;
- Comparando as caracterizações do Solo Teste 1 e do Solo Teste 2, pode-se concluir que para a aplicação do biossólido, é recomendado que o solo não tenha passado por processos de adubação, pois isso limitou as taxas de aplicação do biossólido no Solo Teste 1;

- O custo atual para a disposição do lodo no aterro sanitário municipal é equivalente aos custos do transporte do biossólido em um raio de até 134km de distância da Fábrica. Nesse sentido, áreas inseridas neste raio de distância, e que atendam aos aspectos legais, podem ser beneficiadas pela aplicação do biossólido;
- A economia com a aquisição de adubos minerais convencionais com a aplicação do lodo foi de 58%, representando R\$576,18 por hectare;
- O presente trabalho mostrou ser possível ambientalmente e economicamente a aplicação do biossólido em áreas de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. H. M. de. *et al.* Urban solid waste in the production of Lafoensia pacari seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 2, p. 83-87, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p83-87>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/btJ8zVDm7kJCyGy7Rd4VfLJ/?lang=en>. Acesso em: 20 maio 2024.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. P. 319-396.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. Introdução. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. P. 13-16.
- ANSARI, M. S. *et al.* Effects of heavy metals present in sewage sludge, their impact on soil fertility, soil microbial activity, and environment. *In*: SHAH, M. P. *et al.* **Treatment and Reuse of Sewage Sludge: An Innovative Approach for Wastewater Treatment**. Elsevier, 2022, p. 197-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85584-6.00013-3>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323855846000133?via%3Dihub>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10004**: Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10005**: Ensaio de Lixiviação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10006**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BARCELLOS, T. Fertilização em excesso? Entenda os riscos da overfert e saiba como evitar que ela ocorra. **Aegro**, 21 fev. 2024. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/overfert/#:~:text=Maiores%20dosagens%20de%20fertilizantes%20elevam,tamb%C3%A9m%20pode%20prejudicar%20a%20cultura>. Acesso em: 22 maio 2024.
- BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no distrito federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**, 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- BENNAMOUN, L. Solar drying of wastewater sludge: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 1061-1073, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111004837?via%3Dihub>. Acesso em: 30 mar. 2024.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. P. 25-35.

BITTENCOURT, S. *et al.* Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo. Nota Técnica 6 – Uso agrícola de biossólido. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 75-87, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5327/276455760201006>. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/cadernos-tecnicos-revista-esa-ict/>. Acesso em: 29 mar 2024.

BOEIRA, R. C. Lixiviação de nitrogênio em latossolo incubado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 4, p.947-958, ago. 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/577030/lixiviacao-de-nitrogenio-em-latossolo-incubado-com-lodo-de-esgoto>. Acesso em: 22 maio 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Altera os prazos estabelecidos nos arts. 18 e 19 da Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 20 ago. 2020. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=752>. Acesso em: 30 abr. de 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 16 maio 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. O Setor de Fertilizantes e insumos para a nutrição de plantas no Brasil – Estatísticas do Setor. [Brasília]: **Ministério da Agricultura e Pecuária**, 03 maio 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor>. Acesso em: 08 jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 27, de 5 de junho de 2020. Dispõe sobre os procedimentos para a produção e a comercialização de sementes e mudas. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, 8 jun. 2020. Acesso em: 25 mar. 2024.

BRASIL. Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente (SRH/MMA) / Agência Nacional de Águas (ANA). **Curso de Manejo e Cuidados no Uso da Vinhaça na Fertirrigação (4h)**. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: https://capacitacao.ana.gov.br/images/curso_manejo_e_cuidados_no_uso_da_vinhaça_fertirrigacao/Manejo_de_vinhaca.pdf. Acesso em: 31 maio 2024.

CARANTELLA, H. *et al.* **Boletim 100**: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 2022.

CARDOSO, R. N. **Implantação das medidas e dispositivos de segurança referentes à insalubridade por umidade dos trabalhadores na produção de fibra de vidro**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1SRYLoYjURPDZEJYpP92UQgzO_Z1LwaQo/view. Acesso em: 15 abr. 2024.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021. Dispõe sobre a aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. São Paulo: CETESB.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Norma Técnica P 4.230/2021**: Aplicação de lodo de sistemas de tratamento biológico de efluentes líquidos sanitários em solo – diretrizes e critérios para projeto e operação. São Paulo: CETESB.

CHIBA, M. K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**. 2005. Tese de Doutorado (Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-15032006-142618/fr.php>. Acesso em: 26 abr. 2024.

DAI, X. *et al.* High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: Stability and performance. **Waste Management**, v. 33, 2 ed, p. 308-316, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12004813>. Acesso em: 08 dez. 2023.

DYNIA, J. F.; BOEIRA, R. C.; SOUZA, M. D. Nitrato no perfil de um latossolo vermelho distroférico cultivado com milho sob aplicações sequenciais de lodo de esgoto. In: BETTIOL, W. e CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto**: Impactos ambientais na agricultura. 1. Ed. Jaguariúna: Embrapa, 2006. Cap. 5, p. 79-89.

FAGNANI, K. C. *et al.* An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, 2 ed, n. 102996, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102996>. Disponível em: An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries – ScienceDirect. Acesso em: 20 maio 2024.

FERREIRA, A.C. **Monitoramento do uso de estufa plástica e aproveitamento do biogás na secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

GOOGLE. **Google Earth Pro**: Rio Claro. 17 jun. 2024.

GOOGLE. **Google Earth Pro**: Rio Claro. 26 jun. 2024.

HANUM, F. *et al.* Treatment of sewage sludge using anaerobic digestion in Malaysia: Current state and challenges. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, p. 19, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00019>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2019.00019/full>. Acesso em: 5 dez. 2023.

HISTÓRICO. **Câmara Municipal de Engenheiro Coelho/SP**, 2021. Disponível em: <https://www.camaraengenheirocoelho.sp.gov.br/imprensa/institucional/o-Municipio/1/2022/2#:~:text=Engenheiro%20Coelho%20possui%20uma%20%C3%A1rea,de%20grande%20e%20m%C3%A9dio%20porte>. Acesso em: 22 abr. 2024.

HWANG, I.H.; OUCHI, Y.; MATSUTO, T. Characteristics of leachate from pyrolysis residue of sewage sludge. **Chemosphere**, v. 68, 10 ed, p. 1913-1919, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.02.060>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653507003165>. Acesso em: 08 dez. 2023.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 4 ed., 2009.

KURAHASHI, K. *et al.* Value-adding conversion and volume reduction of sewage sludge by anaerobic co-digestion with crude glycerol. **Bioresource Technology**, v. 232, p. 119-125, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417301190>. Acesso em: 05 dez. 2023.

LARA, A. I.; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. P. 463-481.

LÉONARD, A. *et al.* Wastewater sludge convective drying: influence of sludge origin. **Environmental technology**, v. 25, n. 9, p. 1051-1057, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2004.9619398>. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2004.9619398?casa_token=1-j4oLxFGwEAAAAA:hbUG0cgwxMaXFVro5Pn2OGRCRnlvm_gG-fQOw2JAiTZxyoeGhrWdz3la4Jy-lQsOVOW7WwtAOoycteU. Acesso em: 30 mar. 2024.

LIMA, M. de F. de *et al.* **Manual de Uso Agrícola e Disposição do Lodo de Esgoto para o Estado do Espírito Santo: Aspectos Legais de Utilização do Lodo de Esgoto na Agricultura**. Vitória: INCAPER, 2011. P. 19-22.

MAHAPATRA, K. *et al.* Agronomic application of food processing industrial sludge to improve soil quality and crop productivity. **Geoderma**, v. 207-208, n. 21, p. 205-211, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.014>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706113001687?via%3Dihub>. Acesso em: 19 jan. 2024.

MAJEE, S. *et al.* Bio-organic fertilizer production from industrial waste and insightful analysis on release kinetics. **Journal of Environmental Management**, v. 325, p. 116378, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116378>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972201951X?casa_token=4ajGw2fwtmUAAAAA:iLjPXGIMfFhJwR_eKGyE6HN2UJZ_-CIJfJcdzWoe2RRqA6vPokwCg1yLfokHxXkkBzinjhxnv88u. Acesso em: 19 jan. 2024.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1984 p.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2018. 418 p.
NOTAROBERTO, M. C. G.; CARVALHO, F. R. de. Ciência e tecnologia tornaram o Brasil um dos maiores produtores mundiais de alimentos. **Embrapa Notícias**, 14 out. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/75085849/ciencia-e-tecnologia-tornaram-o-brasil-um-dos-maiores-produtores-mundiais-de-alimentos>. Acesso em: 08 jan. 2024.

PEREIRA, A. C. A. **Efeitos da disposição de lodo de ETE de indústria alimentícia no solo: Estudo de caso**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/1404e282-be73-4cb5-84a9-c8d7f9eedb21/content>. Acesso em: 21 mai. 2023.

POULSEN, T. G.; BESTER, K. Organic micropollutant degradation in sewage sludge during composting under thermophilic conditions. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 13, p. 5086-5091, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/es9038243>. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es9038243?casa_token=39pfNhw6iPUAAAAA%3ADDvLcyraGjPOv2d06rXOu2F9d4t4ku3g4RKt60XAUGRKR08jwsM1IKJKu5f6npw8_i709UxeilWQ0ibKg. Acesso em: 08 dez. 2023.

RAIJ, B.V. *et al.* **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 300 p.

RESENDE, H., BOTREL, M. de A., ALVIM, M. J. Calagem e Adubação de Plantio. **Embrapa**. 08 dez. 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/criacoes/gado_de_leite/producao/sistemas-de-producao/alimentacao/formacao-e-manejo-de-pastagens/calagem-e-adubacao-de-plantio#:~:text=A%20calagem%20dever%C3%A1%20ser%20feita,forrageiras%20para%20silagem%20no%20plantio. Acesso em: 01 jun. 2021.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2001. 113 p.

RIO CLARO (SÃO PAULO). In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2024. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Rio_Claro_\(S%C3%A3o_Paulo\)&oldid=67963830](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Rio_Claro_(S%C3%A3o_Paulo)&oldid=67963830). Acesso em: 18 mai. 2023.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.

SAITO, M. L. **O uso do lodo de esgoto na agricultura: precauções com os contaminantes orgânicos**. 1 ed. Jaguariúna: Embrapa Meio ambiente, 2007. 35 p.
SALATI, P. Brasil supera EUA e se torna maior exportador de milho do mundo. **g1**, 01 ago. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2023/09/01/brasil-supera-eua-e-se-torna-maior-exportador-de-milho-do-mundo-este-ano.ghtml> Acesso em: 08 jan. 2024.

SALIHOGU, N. K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. Solar drying in sludge management in Turkey. **Renewable energy**, v. 32, n. 10, p. 1661-1675, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.08.001>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810600228X?casa_token=C6FVgHx0fE0AAAAA:jWTy2IelvaLna4fJWIYazkYzQhKBzjOVyLsw3fNUklvDqonc4Ba0PnOHhp9NEZgGgHY3mpsbUNxu. Acesso em: 30 mar. 2024.

SALSABIL M. R. *et al.* Techno-economic evaluation of thermal treatment, ozonation and sonication for the reduction of wastewater biomass volume before aerobic or anaerobic digestion. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, v. 174, 1-3 ed. P. 323 – 333, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.054>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389409015155>. Acesso em: 05 dez. 2023.

SILVA, C. de S. **Aproveitamento energético de biossólido industrial na produção canavieira**. 2018. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Economia e Aproveitamento energético) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13493>. Acesso em: 2 jun. 2024.

SILVA, M. S. L. da; NETO, M. B. de O. Argissolos Vermelho-Amarelos. **Embrapa**. 09 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-mata-sul-pernambucana/caracteristicas-do-territorio/recursos-naturais/solos/argissolos-vermelho-amarelos#:~:text=S%C3%A3o%20solos%20profundos%20e%20muito,A%2C%20E%2C%20Bt%20etc>. Acesso em: 31 maio 2024.

SPERA, S. T. *et al.* Solos arenosos no brasil: problemas, riscos e opções de uso. **Revista de Política Agrícola**, ano 7, n. 2, 1998. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/210>. Acesso em: 22 abr. 2024.

TANK, V. *et al.* Caracterização físico-química e ecotoxicológica de lodo de estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil. In: **Open Science Research III**.

Científica Digital, v. 3, 2022, p. 2914-2930. DOI 10.37885/220308160. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/caracterizacao-fisico-quimica-e-ecotoxicologica-de-lodo-de-estacao-de-tratamento-de-efluentes-de-uma-industria-textil>. Acesso em: 29 nov. 2023.

TEOH, S. K.; LI, L. Y. Feasibility of alternative sewage sludge treatment methods from a lifecycle assessment (LCA) perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, n. 119495, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119495>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619343653>. Acesso em: 08 dez. 2023.

TIWARI, A. K.; PAL, D. B. Nutrients contamination and eutrophication in the river ecosystem. In: MADHAV, S. et al. **Ecological Significance of River Ecosystems**. Elsevier, 2022, p. 203-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00001-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323850452000017>. Acesso em: 12 dez. 2023.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 8260C. Volatile organic compounds by gas chromatography/ mass spectrometry**: Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW846). Washington: USEPA, 1996.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **625/R-92/013: Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge**. Washington: USEPA, 2003.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Standards for the use or disposal of sewage sludge**: decision not to regulate dioxins in applied land sewage sludge. Federal Register. v. 68 n. 206. 2003.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 9045D. Soil and waste pH**. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW846). Washington: USEPA, 2004.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 245.7: Mercury in water by cold vapor atomic fluorescence spectrometry**. Washington: USEPA, 2005.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 6010. Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry**: Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW846). Washington: USEPA, 2007.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 8270D. Semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry**: Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW846). Washington: USEPA, 2007.

TIWARI, N.; AWASTHI, S. Sewage treatment and reuse by aerobic and anaerobic digestion and physicochemical post-treatment. In: SHAH, M. P. Shah et al. **Development in Waste Water Treatment Research and Processes**. Elsevier,

2022, p. 409-431. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85584-6.00023-6>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323855846000236>. Acesso em: 08 dez. 2023.

VAN CANEGHEM, J. *et al.* Mass balance for POPs in hazardous and municipal solid waste incinerators. **Chemosphere**, v. 78, 6 ed, p. 701-708, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.036>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653509013939>. Acesso em: 08 dez. 2023.

VELOSO, C. Veja os preços do Cloreto de Potássio e outros fertilizantes usados na agricultura brasileira. **Verde Blog**, 27 maio 2024. Disponível em: <https://blog.verde.ag/pt/mercado-agricola/veja-os-precos-do-cloreto-de-potassio-e-outros-fertilizantes-usados-na-agricultura-brasileira/>. Acesso em: 27 maio 2024.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos**: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. P. 17-26.

WONG, J.W.C., SELVAM, A. Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. **Chemosphere**, v. 63, 6 ed, p. 980-986, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.08.045>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653505010933>. Acesso em: 08 dez. 2023.

ANEXOS

**ANEXO A – SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS QUE CONSTAM NA DECISÃO DE
DIRETORIA CETESB N.º 125/2021/E**

(continua)

Substância	Unidade	VP
Benzeno	mg/kg	0,002
Estireno	mg/kg	0,5
Etilbenzeno	mg/kg	0,03
Tolueno	mg/kg	0,9
Xilenos	mg/kg	0,03
Antraceno	mg/kg	0,3
Benzo(a)antraceno	mg/kg	0,2
Benzo(b)fluoranteno	mg/kg	0,7
Benzo(k)fluoranteno	mg/kg	0,8
Benzo(g,h,i)perileno	mg/kg	0,5
Benzo(a)pireno	mg/kg	0,1
Criseno	mg/kg	1,6
Dibenzo(a,h)antraceno	mg/kg	0,2
Fenantreno	mg/kg	3,6
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	mg/kg	0,4
Naftaleno	mg/kg	0,7
Clorobenzeno (mono)	mg/kg	0,3
1,2-Diclorobenzeno	mg/kg	0,7
1,3-Diclorobenzeno	mg/kg	0,4
1,4-Diclorobenzeno	mg/kg	0,1
1,2,3-Triclorobenzeno	mg/kg	0,01
1,2,4-Triclorobenzeno	mg/kg	0,01
1,3,5-Tetraclorobenzeno	mg/kg	0,5
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	mg/kg	0,003
1,2,3,5- Tetraclorobenzeno	mg/kg	0,006
1,2,4,5- Tetraclorobenzeno	mg/kg	0,01
Hexaclorobenzeno	mg/kg	0,02
1,1-Dicloroetano	mg/kg	0,02
1,2-Dicloroetano	mg/kg	0,001
1,1,1-Tricloroetano	mg/kg	0,2
Cloreto de vinila	mg/kg	0,0002
1,1-Dicloroetano	mg/kg	0,04
1,2-Dicloroetano – cis	mg/kg	0,01
1,2- Dicloroetano – trans	mg/kg	0,03
Tricloroetano - TCE	mg/kg	0,004
Tetracloroetano - PCE	mg/kg	0,03
Cloreto de Metileno	mg/kg	0,03
Clorofórmio	mg/kg	0,06
Tetracloroeto de carbono	mg/kg	0,004
2-Clorofenol (o)	mg/kg	0,06
2,4-Diclorofenol	mg/kg	0,03

**ANEXO A – SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS QUE CONSTAM NA DECISÃO DE
DIRETORIA CETESB N.º 125/2021/E**

(conclusão)

Substância	Unidade	VP
3,4-Diclorofenol	mg/kg	0,05
2,4,5-Triclorofenol	mg/kg	0,1
2,4,6-Triclorofenol	mg/kg	0,1
2,3,4,5-Tetraclorofenol	mg/kg	0,09
2,3,4,6-Tetraclorofenol	mg/kg	0,01
Pentaclorofenol (PCP)	mg/kg	0,01
Cresóis totais	mg/kg	0,2
Cresol-p	mg/kg	0,005
Fenol	mg/kg	0,2
Dietilexil ftalato (DEHP)	mg/kg	1
Dietil ftalato	mg/kg	0,5
Dimetil ftalato	mg/kg	0,25
Di-n-butil ftalato	mg/kg	0,1
Aldrin	mg/kg	0,02
Dieldrin	mg/kg	0,01
Endrin	mg/kg	0,001
Carbofuran	mg/kg	0,0001
Endossulfan	mg/kg	0,7
DDD	mg/kg	0,02
DDE	mg/kg	0,01
DDT	mg/kg	0,01
HCH alfa	mg/kg	0,0003
HCH beta	mg/kg	0,001
HCH – gama (Lindano)	mg/kg	0,001
PCBs Indicadores	mg/kg	0,0003
TBT e seus compostos	mg/kg	0,24
Anilina	mg/kg	0,023
Dioxinas (PCDDs) e Furanos (PCDFs)	mg/kg	2

VP: Valor de prevenção.

Fonte: Adaptado de CETESB DD 125/2021 (CETESB, 2021).

ANEXO B - RESULTADOS DAS ANÁLISES MENSALIS DE ARSÊNIO (AS) NO TANQUE DE EQUALIZAÇÃO (EFLUENTE BRUTO)

Data da análise	Parâmetro	Unidade	Resultado	VMP - ARTIGO 19A Decreto 8468/76
11/01/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
22/02/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
17/03/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
12/04/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
15/05/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
14/06/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
12/07/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
09/08/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
13/09/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
11/10/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5
08/11/2023	Arsênio	mg/L	0,018	1,5
14/12/2023	Arsênio	mg/L	ND	1,5