

BÁRBARA FRANCA DOS SANTOS

**DESTINAÇÃO DE LODO BIOLÓGICO DA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS: UMA
ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Ann Honor Munteer

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237d
2023 Santos, Bárbara Franca dos, 1990-
Destinação de lodo biológico da indústria de cosméticos:
uma abordagem de ciclo de vida / Bárbara Franca dos Santos. –
Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (48 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Ann Honor Mounteer.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2023.

Referências bibliográficas: f. 44-48.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.206>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Águas residuais - Purificação - Processo de lodo ativado.
2. Carbono ativado. 3. Compostagem. 4. Pirólise.
5. Cosméticos - Indústria. I. Mounteer, Ann Honor, 1959-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 628.35

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB-6/2523

BÁRBARA FRANCA DOS SANTOS

DESTINAÇÃO DE LODO BIOLÓGICO DA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS: UMA
ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

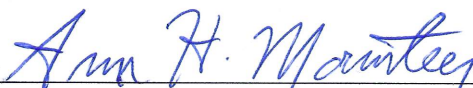
APROVADA: 14 de fevereiro de 2023.

Assentimento:



Bárbara Franca dos Santos

Autora



Ann Honor Mounter

Orientadora

**Aos meus amados pais,
Terezinha e Edmar,
dedico.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por governar a minha vida, me abençoar todos os dias e me dar a oportunidade de realizar um dos meus sonhos.

Agradeço aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram para que esse sonho pudesse estar acontecendo, divido com vocês as alegrias dessa vitória.

Agradeço à minha orientadora Ann Mounteer e à minha coorientadora Natália Renato, por acreditarem em mim, pelas orientações e por todo o suporte que me ofereceram para vencer este desafio.

Agradeço ao pesquisador Lucas Casseres, que gentilmente se disponibilizou em compartilhar comigo seus conhecimentos; e ao colega Keivison Almeida, pela parceria durante todo o curso.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta ajudaram durante a execução e conclusão desse trabalho, muito obrigada!

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.
(Leonardo da Vinci)

RESUMO

SANTOS, Bárbara Franca dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Destinação de lodo biológico da indústria de cosméticos: uma abordagem de ciclo de vida.** Orientadora: Ann Honor Mounteer.

O tratamento de águas residuais da indústria de cosméticos corporais e capilares é gerador de lodo, cuja disposição final é desafiadora para a indústria em virtude dos impactos ambientais relacionados. Visando compreender a origem desses impactos e mensurá-los, a Avaliação de Ciclo de Vida é uma das metodologias que vem sendo aplicadas. No entanto, a literatura carece de estudos que avaliem os potenciais impactos ambientais deste resíduo. A partir da demanda observada, foi desenvolvida nesse trabalho uma avaliação comparativa de ciclo de vida de duas alternativas para o tratamento e a destinação do lodo biológico gerado em uma ETE de indústria cosmética localizada em Minas Gerais, Brasil. Os resultados obtidos apontaram que, dentre as alternativas estudadas, a síntese de carvão ativado apresentou maiores impactos ambientais quando comparado ao processo de compostagem para obtenção de composto orgânico, revelando que o impacto ambiental da compostagem representou entre 0,02% e 11,35% do impacto do processo de síntese de carvão ativado, nas categorias avaliadas. Contudo, apesar de ser causador de maior impacto ambiental, a síntese de material adsorvente gera produtos de maior valor agregado, capazes de solucionar problemas ambientais mais desafiadores. Através dos resultados das investigações efetuadas neste trabalho, tornou-se possível ter uma compreensão mais significativa acerca da dimensão dos impactos ambientais das alternativas estudadas para o tratamento e a destinação do lodo biológico da indústria cosmética no Brasil. Outra contribuição está no auxílio para a tomada de decisão pelos gestores ambientais na indústria.

Palavras-chave: Carvão ativado. Compostagem. Pirólise. ReCiPe.

ABSTRACT

SANTOS, Bárbara Franca dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2023. **Disposal of biological sludge from the cosmetics industry: a lifecycle approach.** Adviser: Ann Honor Mounteer.

The treatment of wastewater from the body and hair cosmetics industry generates sludge, whose destination is challenging for the industry due to the related environmental impacts. In order, the Life Cycle Assessment is one of the methodologies that have been applied to understand the origin and measure these impacts. However, the literature lacks studies that assess the potential environmental impacts of this waste. Based on the observed demand, a comparative life cycle assessment of two alternatives for the treatment and disposal of biological sludge generated in a cosmetic industry wastewater treatment plant located in Minas Gerais, Brazil was developed in this work. The results showed that, among the alternatives studied, the synthesis of activated charcoal had greater environmental impacts when compared to the composting process to obtain organic compost, revealing that the environmental impact of composting represented between 0.02% and 11.35% of the impact of the activated carbon synthesis process, in the assessed categories. However, despite causing greater environmental impact, the synthesis of adsorbent material generates products with higher added value, capable of solving more challenging environmental problems. Through the results of the investigations carried out in this work, it became possible to gain a more significant understanding of the dimension of the environmental impacts of the alternatives studied for the treatment and destination of the biological sludge of the cosmetic industry in Brazil. Another contribution is the support for decision-making by environmental managers in the industry.

Keywords: Activated charcoal. Composting. Pyrolysis. ReCiPe.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estágios do ciclo de vida de um produto..... | 17 |
| Figura 2 - Processo de compostagem. | 21 |
| Figura 3 - Processo de pirólise. | 24 |
| Figura 4 - Fluxograma da metodologia de avaliação de ciclo de vida aplicada ao estudo. | 26 |
| Figura 5 - Fronteira do sistema da alternativa A - Compostagem do lodo de ETE. | 30 |
| Figura 6 - Fronteira do sistema da alternativa B - Síntese de material adsorvente a partir de lodo de ETE..... | 33 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Insumos desconsiderados na construção dos modelos e os produtos que são afetados por estes dados..... | 29 |
| Tabela 2 - Inventário para a produção do composto considerando 1.000kg de lodo..... | 32 |
| Tabela 3 - Fluxos considerados no modelo para a compostagem e seu respectivo processo no banco de dados. | 32 |
| Tabela 4 - Inventário para a síntese de carvão ativado considerando 1.000kg de lodo..... | 34 |
| Tabela 5 - Fluxos considerados no modelo para a síntese de material adsorvente e seu respectivo processo no banco de dados..... | 34 |
| Tabela 6 - Resultados de cada categoria de impacto para as alternativas A e B. | 36 |
| Tabela 7 - Comparativo de resultados por categorias de impacto da alternativa A com a literatura..... | 39 |
| Tabela 8 - Comparativo de resultados por categorias de impacto da alternativa B com a literatura..... | 40 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas. |
| ACV | Avaliação de Ciclo de Vida |
| AICV | Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida |
| CA | Carvão ativado |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| ETE | Estação de Tratamento de Efluentes |
| ICV | Inventário de Ciclo de Vida |
| ISO | International Organization for Standardization |
| NBR | Norma Brasileira |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| Objetivos | 15 |
| 1.1.1 Objetivo Geral..... | 15 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 15 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 16 |
| 2.1 A indústria de cosméticos capilares e suas águas residuárias | 16 |
| 2.1.1 Lodo biológico da indústria de cosméticos | 16 |
| 2.2 Análise de Ciclo de Vida | 17 |
| 2.2.1 Abordagem da ACV em sistemas de tratamento de águas residuárias..... | 18 |
| 2.2.2 Aplicação da ACV para a destinação final do lodo biológico | 19 |
| 2.2.3 Alternativas para o tratamento e a destinação de lodo biológico | 20 |
| 2.2.3.1 Alternativa A: Compostagem para uso agrícola | 20 |
| 2.2.3.2 Alternativa B: Síntese de material adsorvente..... | 24 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 26 |
| 3.1 Mapeamento do processo de geração do lodo biológico | 27 |
| 3.2 Definição do objetivo e escopo da Avaliação do Ciclo de Vida | 27 |
| 3.3 Elaboração dos Inventários de Ciclo de Vida (ICV) das alternativas | 29 |
| 3.3.1 Elaboração do ICV do processo de compostagem | 30 |
| 3.3.2 Elaboração do ICV do processo de síntese de carvão ativado..... | 32 |
| 3.4 Realização da Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) | 35 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 36 |
| 4.1 Comparação entre os impactos das alternativas de destinação do lodo | 36 |
| 4.2 Comparativo de impacto ambiental com a literatura | 38 |
| 4.2.1 Alternativa A – Compostagem | 38 |
| 4.2.2 Alternativa B – Síntese de material adsorvente | 40 |
| 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 43 |
| REFERÊNCIAS | 44 |

1 INTRODUÇÃO

Em razão da crescente expansão do saneamento básico e da melhoria dos processos de tratamento de águas residuárias industriais no Brasil, houve um consequente aumento na geração de lodo de esgoto, de modo que as organizações enfrentam, atualmente, o problemático desafio de destinar adequadamente esse resíduo, considerando os aspectos ambientais e econômicos. A gestão e a destinação de lodo biológico de forma econômica e ambientalmente sustentável são desafios para a indústria cosmética, geradora de significativo volume de águas residuárias que, após tratados, geram o lodo como resíduo deste processo.

Observa-se de forma geral que a escolha do gerenciamento do lodo leva em consideração apenas interesses e possibilidades dos seus responsáveis nas unidades de tratamento, não abrangendo, muitas vezes, aspectos ambientais (ROSA *et al.*, 2015). Desta forma, sabe-se que grande parte do lodo biológico gerado em estação de tratamento de efluente (ETE) não é destinado de maneira ambientalmente correta, causando a poluição do meio ambiente. O gerenciamento e a destinação do lodo são desafios e a busca por alternativas a serem adotadas necessitam de pesquisas.

As práticas na pesquisa de gerenciamento de lodo de esgoto variam ao longo do tempo e de país para país. No Brasil, o principal foco na condução de pesquisas sobre a destinação do lodo de ETE é a aplicação no solo / uso agrícola, seguido pelo interesse da utilização do lodo como matéria-prima e na recuperação de energia (BAGHERI *et al.*, 2023).

Na última década, destaca-se o domínio de pesquisas desenvolvidas no país referentes à aplicação do lodo de esgoto no solo e compostagem para uso agrícola (BREDA *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2020; SCOTON *et al.*, 2016). Outras alternativas de tratamento e destinação de lodo vem sendo empregadas de forma incipiente no Brasil, principalmente em pesquisas (BITTENCOURT *et al.*, 2017), como por exemplo, o uso como matéria-prima para a produção de adsorventes (MONTEIRO *et al.*, 2022; RIBEIRO *et al.*, 2021); a recuperação energética (ROSA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2023); e a aplicação na construção civil, como matéria-prima para a produção de tijolos, telhas, cerâmicas e como base para pavimentação (AREIAS *et al.*, 2023; FERREIRA *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2020; ZAT *et al.*, 2021).

Dentre as alternativas de destinação de lodo de esgoto mencionadas, a compostagem de lodo biológico para uso agrícola é uma alternativa bastante promissora considerando-se que o lodo de esgoto possui considerável quantidade de matéria orgânica e de nutrientes que são essenciais para o desenvolvimento vegetal, apresentando um potencial uso na recuperação de áreas degradadas e como fonte de nutrientes para cultivos agrícolas e florestais (BITTENCOURT *et al.*, 2017).

Destaca-se também a busca crescente por formas de utilização de resíduos como matéria-prima para a produção de materiais com valor agregado. Uma alternativa sustentável para a disposição do lodo residual consiste no seu tratamento térmico. Essa prática tem se mostrado promissora, podendo gerar produtos com valor agregado como, por exemplo, o biocarvão (RIBEIRO *et al.*, 2021).

No entanto, percebe-se que existe uma lacuna na literatura científica referente aos potenciais impactos ambientais adversos da gestão e destinação final do lodo gerado no tratamento de águas residuárias industriais, mais especificamente, do lodo proveniente da indústria cosmética.

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é um instrumento de gestão ambiental de grande potencial adotado internacionalmente no século 21 (DING *et al.*, 2021). Visando avaliar o impacto ambiental de produtos e serviços e para ajudar a obter consistência na política e no planejamento ambiental, a ACV aplicada ao tratamento e descarte de lodo tem sido amplamente utilizado nos últimos anos (DING *et al.*, 2021), se mostrando uma ferramenta capaz de subsidiar análises e tomadas de decisão para a destinação final do lodo, considerando os aspectos técnicos e de desempenho ambiental associados às alternativas disponíveis. Diante disso, a ACV é apropriada para ser aplicada na gestão do lodo de origem industrial, difundindo o uso da ACV na busca de melhoria de políticas e práticas por indústrias e empresas.

A ACV é um instrumento globalmente padronizado, sendo no Brasil pelas Normas ABNT das séries ISO 14040 e 14044, que pode contribuir para a avaliação da alternativa mais adequada para um determinado produto, enfocando os aspectos ambientais e os impactos ambientais adversos potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final, isto é, do berço ao túmulo (ABNT, 2009a). Adicionalmente, a técnica ACV pode também ser aplicada a partes específicas do ciclo de vida, como por exemplo, no gerenciamento de resíduos (ABNT,

2009a). Neste contexto, o presente estudo foi conduzido com uma abordagem focada no tratamento e destinação de lodo de ETE industrial, sem considerar as etapas de geração do subproduto do tratamento de águas residuárias.

Diante da viabilidade técnica das alternativas de tratamento e destinação do lodo biológico de ETE abordadas, este trabalho propôs um estudo ambiental, que objetivou avaliar os aspectos e impactos ambientais adversos associados a cada uma das alternativas investigadas para a destinação de lodo biológico da indústria cosmética. Foi realizada a ACV de duas alternativas de tratamento e destinação de lodo de ETE da indústria cosmética, a fim de apresentar uma comparação entre as opções estudadas: a compostagem para uso agrícola e a síntese de material adsorvente. Com isso, desejou-se neste estudo auxiliar na percepção da dimensão dos impactos ambientais relacionados ao tratamento e à destinação do lodo biológico proveniente de ETE da indústria cosmética e auxiliar a tomada de decisão, objetivando processos industriais cada vez mais limpos e sustentáveis.

Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar, por meio de análise do ciclo de vida, a performance ambiental de duas alternativas de destinação de lodo de uma ETE de indústria de cosméticos capilares e corporais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Estruturar inventário de ciclo de vida referente ao tratamento e destinação final de lodo biológico da indústria de cosméticos capilares e corporais, considerando as seguintes alternativas: compostagem para uso agrícola e síntese de material adsorvente.
- ii. Identificar, dentre os cenários estudados, a alternativa de destinação com menores impactos ambientais adversos.
- iii. Subsidiar a identificação de oportunidades e tomadas de decisão para a melhoria do desempenho ambiental da ETE da indústria de cosméticos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A indústria de cosméticos capilares e suas águas residuárias

Nos últimos anos, a indústria de cosméticos vem apresentando crescimento expressivo no Brasil (ABIHPEC, 2021). A indústria de cosméticos está dividida em cinco segmentos, que compreendem: cuidados com a pele, cuidados com os cabelos, maquiagem, fragrâncias e outros (desodorantes, protetores solares etc.) (MELO *et al.*, 2013). Neste contexto, o segmento de cosméticos capilares destina-se à fabricação de shampoos, condicionadores e produtos para tratamentos capilares, como por exemplo, banhos de creme, óleos e finalizadores.

O processo de fabricação de cosméticos é gerador de um grande volume de águas residuárias, que normalmente são caracterizadas por baixa biodegradabilidade, alta carga de matéria orgânica recalcitrante, presença de altos teores de sólidos suspensos totais, gorduras e óleos. Ressalta-se ainda que a composição das águas residuárias pode variar ao longo do dia, dependendo do produto que está sendo manipulado (RIBEIRO *et al.*, 2021).

As águas residuárias geradas pelos fabricantes de produtos para os cabelos normalmente têm alta demanda química de oxigênio (DQO), decorrente da presença de compostos como surfactantes, óleos naturais, corantes e fragrâncias, alguns dos quais pouco biodegradáveis (MELO *et al.*, 2013).

2.1.1 Lodo biológico da indústria de cosméticos

O tratamento das águas residuárias da indústria de cosméticos é gerador de lodo, um subproduto inevitável do tratamento. O lodo pode ser definido como o resíduo sólido ou semissólido gerado do tratamento de águas residuárias. A composição química do lodo é complexa, contendo uma grande variedade de compostos orgânicos e inorgânicos, que dependerão da composição das águas residuárias (RIBEIRO *et al.*, 2021). O lodo secundário ou biológico é gerado durante o tratamento biológico de águas residuárias.

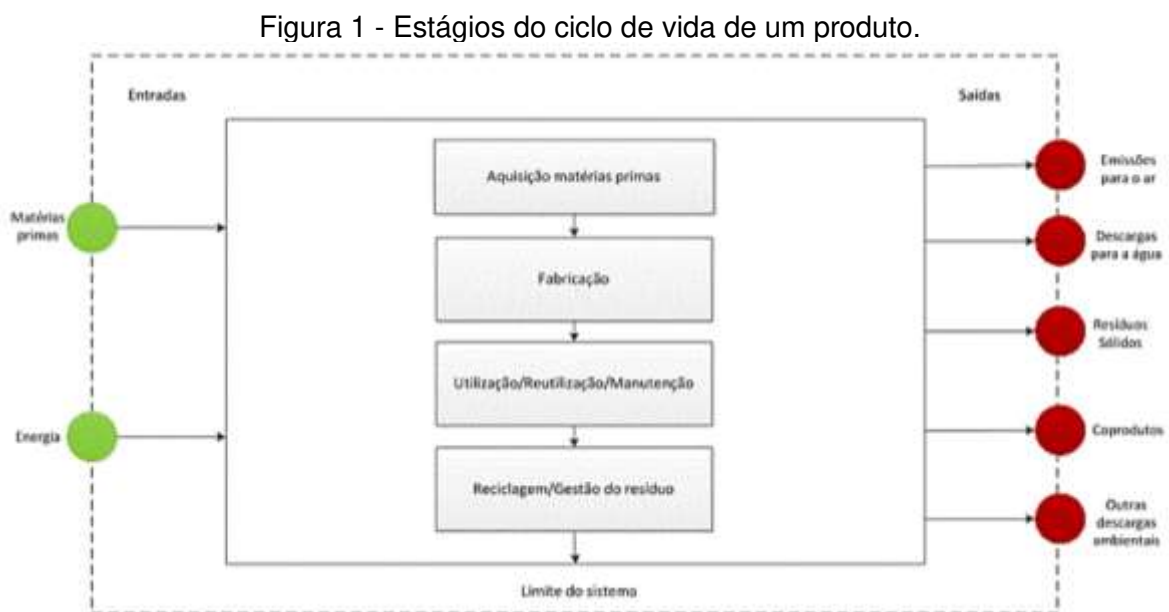
O reconhecimento desse lodo biológico como um recurso, não como um resíduo, expande as possibilidades para o seu gerenciamento e eleva o seu potencial como fonte de materiais e de energia, capaz de minimizar a demanda de extração de

outros recursos naturais e, conseqüentemente, reduzir o impacto sobre o meio ambiente. Visando a valorização do lodo biológico e um melhor desempenho ambiental no gerenciamento do resíduo proveniente do tratamento de águas residuárias, o lodo pode ser destinado para alternativas de recuperação de materiais e de energia no contexto de uma economia mais circular.

2.2 Análise de Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) corresponde à compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais adversos potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida; que por sua vez, consiste nos estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição das matérias-primas ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final. Assim, a ACV considera todo o ciclo de vida de um produto para o estudo das cargas ambientais associadas aos diversos estágios de um sistema ou produto desde a extração e aquisição de matérias-primas, a quantificação de energia e materiais, manufatura, uso, tratamento, até a disposição final. Com base em tal visão, a transferência de cargas ambientais potenciais entre estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser levantada e, possivelmente, evitada (ABNT, 2009a).

A Figura 1 apresenta os possíveis estágios de ciclo de vida que podem ser considerados numa ACV e as típicas entradas/saídas medidas.



Fonte: Gutierrez (2014).

A ACV é um instrumento globalmente padronizado, sendo no Brasil pelas Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) das séries ISO 14040 e 14044, que pode contribuir para a avaliação da alternativa mais adequada para um determinado produto, enfocando os aspectos ambientais e os impactos ambientais adversos potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final, isto é, do berço ao túmulo (ABNT, 2009a). Adicionalmente, a técnica ACV pode também ser aplicada a partes específicas do ciclo de vida, como por exemplo, no gerenciamento de resíduos (ABNT, 2009a).

Os estudos de ACV podem ser divididos em quatro etapas principais, conforme descrito na Norma ISO 14040: Fase 1 - Definição de objetivo e escopo, que busca definir o propósito e extensão do estudo, a partir do estabelecimento de suas fronteiras; fase 2: Inventário de Ciclo de Vida (ICV), etapa que envolve a coleta dos dados necessários e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto; fase 3: Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), que tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV; e fase 4: Interpretação, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo (ABNT, 2009a).

2.2.1 Abordagem da ACV em sistemas de tratamento de águas residuárias

O setor de saneamento básico e, mais especificamente, o esgotamento sanitário tem grande visibilidade junto à comunidade técnico-científica, visto a relevância e históricos benefícios de melhoria na saúde humana. Entretanto, mesmo considerando o caráter ambientalmente favorável de uma ETE, tendo em vista sua contribuição para a minimização de impactos relacionados à depleção de oxigênio, eutrofização, lançamento de substâncias tóxicas nos corpos receptores e danos à saúde humana, é necessário atentar para o fato de que a operação de uma ETE também dá origem a impactos ambientais. Esses impactos ocorrem, por exemplo, devido ao consumo de energia, ao uso de compostos químicos, às emissões para a atmosfera e à produção de subprodutos sólidos (GUTIERREZ, 2014). Neste sentido, fazem-se necessários instrumentos de avaliação ambiental que caracterizem os

impactos positivos e negativos associados a cada etapa do processo, em função do consumo de recursos e da geração de subprodutos, a fim de identificar melhorias de desempenho ambiental.

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos e sistemas, têm aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com esses impactos ambientais. Uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo é a ACV (ABNT, 2009a), que tem sido aplicada em sistemas de tratamento de águas residuárias com sucesso. A variedade de iniciativas de pesquisas de ACV ao redor do mundo, que buscam, dentre outros objetivos, a padronização dos estudos e a construção de banco de dados específicos, aponta que essa metodologia será consolidada como importante suporte na área de tratamento de águas residuárias (DING *et al.*, 2021; GUTIERREZ, 2014).

2.2.2 Aplicação da ACV para a destinação final do lodo biológico

É conhecido que o lodo biológico proveniente do tratamento de águas residuárias pode conter substâncias tóxicas diversas, metais pesados, patógenos, contaminantes orgânicos e compostos menos biodegradáveis. Assim, a disposição deste lodo pode provocar impactos danosos ao meio ambiente quando não tratado de maneira adequada. A gestão e disposição do lodo de ETE de forma economicamente viável e ambientalmente correta é um grande desafio (DEVI e SAROHA, 2017).

A ACV pode subsidiar a identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental e o nível de informação dos tomadores de decisão na indústria (ABNT, 2009a). Mais especificamente, a ACV aplicada à destinação de lodo de ETE industrial se mostra como um instrumento para a gestão desse resíduo, podendo auxiliar os gestores das indústrias na escolha da melhor destinação, do ponto de vista ambiental, para o resíduo da ETE.

Neste contexto, destacam-se os trabalhos de Huang *et al.*, (2022) e Morsking-Georgali *et al.*, (2022) e Tarpani *et al.*, (2020), que aplicaram anteriormente a ACV em estudos para estimar os impactos ambientais de alternativas de tratamento e destinação do lodo de esgoto.

2.2.3 Alternativas para o tratamento e a destinação de lodo biológico

Os principais processos de disposição final do lodo de esgoto são aterros, uso agrícola e incineração (RIBEIRO *et al.*, 2021). No entanto, aterro sanitário não é mais uma opção sustentável, devido aos custos crescentes de disposição, restrições no uso do solo e regulamentações ambientais mais rígidas. Além disso, a incineração é um processo caro e produz gases de efeito estufa e outros compostos tóxicos como dioxinas e furanos. Portanto, tanto o aterro quanto a incineração foram prejudicados por uma imagem pública ruim e legislações rígidas (DEVI e SAROHA, 2017).

O declínio das rotas tradicionais de disposição de lodo criou uma alta demanda por alternativas mais econômicas e ambientalmente benignas (DEVI e SAROHA, 2017). Além disso, o reconhecimento do lodo como recurso, não como resíduo, fez com que os pesquisadores considerassem a recuperação de componentes valiosos do lodo, como carbono e nutrientes e a possibilidade de obtenção de energia a partir deste subproduto do tratamento de águas residuárias (GHERGHEL *et al.*, 2019).

Diante do exposto, destacam-se duas alternativas que vêm sendo alvo de pesquisas para a destinação do lodo de ETE: a compostagem para uso agrícola (FARIA, 2018; RIBEIRO, 2018; VISENTIN, 2019) e a síntese de materiais adsorventes (DEVI e SAROHA, 2017; JELLALI *et al.*, 2021; RIBEIRO *et al.*, 2021).

2.2.3.1 Alternativa A: Compostagem para uso agrícola

De acordo com a NBR 13.591/1996, a compostagem é um processo de decomposição biológica da fração orgânica biodegradável dos resíduos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros, desenvolvido em duas etapas distintas: uma de degradação ativa e outra de maturação (ABNT, 1996). Esta definição apresentada pela norma brasileira mostra que a técnica de compostagem imita o que ocorre naturalmente nos ecossistemas, no qual a matéria orgânica vegetal e animal é estabilizada por meio dos processos naturais.

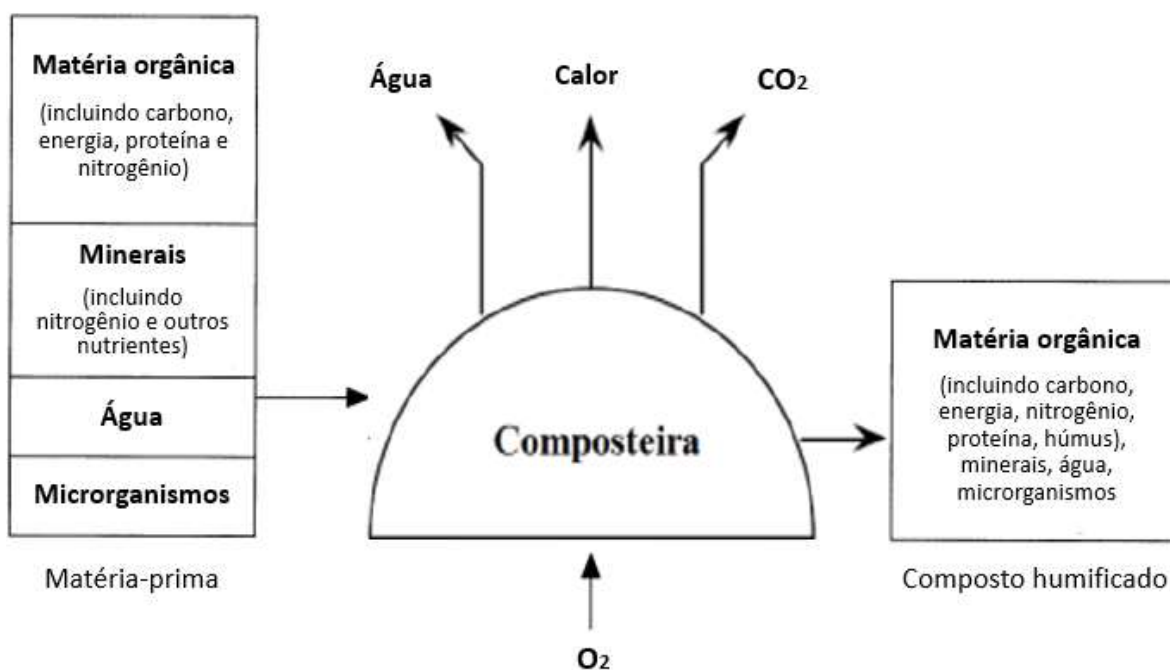
A reciclagem agrícola é uma das destinações de maior interesse para o lodo biológico, uma vez que o material apresenta composição rica em macro e micronutrientes, sendo um excelente fertilizante orgânico (CONTIN *et al.*, 2012, apud RIBEIRO, 2018). Neste contexto, a compostagem é uma alternativa mundialmente

consolidada (BITTENCOURT *et al.*, 2017) e, como método de tratamento de resíduos biológicos, é amplamente considerada como um método limpo e sustentável para gerenciar resíduos orgânicos (LIM *et al.*, 2016). Por meio da compostagem, diferentes materiais orgânicos são transformados em compostos mais estáveis. O produto obtido é o composto que, ao longo do processo de compostagem, foi estabilizado quimicamente, gerando material rico em nutrientes prontamente disponíveis para as plantas (RIBEIRO, 2018), capaz de contribuir para a melhoria das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo (SÁNCHEZ *et al.*, 2017).

O processo de compostagem compreende a conversão de resíduos biodegradáveis em um composto, sendo um processo microbiano aeróbio de deterioração biológica no qual os microrganismos se desenvolvem em condições ricas em oxigênio (GEORGALI *et al.*, 2022). Durante todo o processo de compostagem há liberação de calor, dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água (ANDREOLI *et al.*, 2014). Neste sentido, o alto teor de matéria orgânica no lodo biológico pode resultar em altas emissões de dióxido de carbono durante o processo de tratamento do lodo (LIU *et al.*, 2021).

A Figura 2 ilustra um esquema simplificado do balanço de massa envolvido no processo de compostagem.

Figura 2 - Processo de compostagem.



Fonte: Adaptado de Rynk (1992).

A compostagem em leira aberta é o sistema convencional utilizado para a produção de composto, na qual os materiais sólidos são empilhados em filas paralelas (GEORGALI *et al.*, 2022, SÁNCHEZ *et al.*, 2017).

Para que o processo de compostagem se desenvolva de maneira satisfatória, é necessário que alguns parâmetros físico-químicos sejam atendidos, permitindo que os microrganismos encontrem condições favoráveis para se desenvolverem e transformarem a matéria orgânica. Os principais parâmetros físico-químicos que influenciam o processo de compostagem são: relação C/N, temperatura, umidade, aeração, estrutura e pH (FERNANDES; SILVA, 1999).

Fernandes e Silva (1999) explicam que os microrganismos atuantes no processo de compostagem demandam de carbono, como fonte de energia, e de nitrogênio para síntese de proteínas. É por esta razão que a relação C/N é considerada como fator que melhor caracteriza o equilíbrio dos substratos. A relação C/N inicial ótima do substrato deve se situar em torno de 30 (ASADU *et al.*, 2018; MORSINK-GEORGALI *et al.*, 2022). Sendo o lodo é um resíduo rico em nitrogênio, apresentando relação C/N entre 5,0 e 11,0, o resíduo necessita, portanto, de um resíduo complementar rico em carbono e pobre em nitrogênio, para que a mistura, criteriosamente determinada, apresente relação C/N em torno de 30 (FERNANDES; SILVA, 1999).

Temperatura e umidade são parâmetros que requerem atenção durante o processo de compostagem. A temperatura é fator chave no processo de compostagem, uma vez que indica se a decomposição da matéria orgânica está em andamento (FARIA, 2018); sendo que a compostagem aeróbia pode ocorrer tanto em temperatura termofílica (45 a 85°C) como mesofílica (25 a 43°C). A presença da água é fundamental para as necessidades fisiológicas dos microrganismos que realizam a decomposição da matéria orgânica e que não sobrevivem na sua ausência. A umidade deve ser controlada e mantida entre 40% e 60% durante a maior parte do processo (KIEHL, 2004, apud FARIA, 2018)

Uma vez que a compostagem é um processo aeróbio, a aeração é um dos fatores primordiais para o seu sucesso, visto que controla a taxa de reação, que é responsável pelo aumento da temperatura que humifica e higieniza o composto. Geralmente, a aeração da pilha de compostagem ocorre por meio de revolvimentos frequentes (CARVALHO, 2001; PINTO, 2014; apud FARIA, 2018).

O lodo biológico de ETE é composto por matéria orgânica e nutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal e a compostagem para uso agrícola deste resíduo é uma destinação ambientalmente sustentável, pois promove a reciclagem de nutrientes, sendo benéfico ao cultivo de plantas e às características físico-químicas e biológicas do solo (BITTENCOURT *et al.*, 2017). Neste contexto, a compostagem se apresenta como um processo de tratamento que pode ser aplicado ao lodo biológico de ETE visando seu uso agrícola.

Para que o processo de compostagem com lodo de esgoto seja efetivo, é necessária a incorporação de materiais estruturantes, que têm a função de garantir a integridade estrutural da pilha de compostagem, absorver o excesso de umidade e ainda equilibrar a relação C/N da mistura de resíduos na compostagem (FERNANDES; SILVA, 1999). Os agentes estruturantes de volume têm sido amplamente usados para melhorar o desempenho da compostagem, regulando as propriedades físico-químicas do resíduo a ser compostado e as emissões gasosas do processo (XU *et al.*, 2021).

Dentre os inúmeros resíduos vegetais que podem ser utilizados como material estruturante na compostagem com lodo de esgoto, são recomendados aqueles que possuam uma granulometria que permita a integridade estrutural da pilha de compostagem, facilitem a circulação do oxigênio e que, ainda, possuam baixo teor de umidade e baixo teor de nitrogênio, de modo a equilibrar a relação C/N (FERNANDES; SILVA, 1999, apud FARIA, 2018). Neste sentido, a serragem de madeira tem sido investigada como agente estruturante volumoso (ASADU *et al.*, 2018, MARTINS *et al.*, 2022). Os resíduos de jardins, que são comumente gerados em atividades paisagísticas urbanas, também podem e são comumente usados como agente de volume para a compostagem (XU *et al.*, 2021).

O período demandado para a conclusão do processo de compostagem e obtenção de um composto quimicamente estável, uniforme, inodoro e nutricionalmente viável para fins agrícolas varia de acordo com os materiais empregados no processo, bem como o tipo de processo a ser realizado (RIBEIRO, 2018).

Morsking-Georgali *et al.*, (2022) e Tarpani *et al.*, (2020) desenvolveram trabalhos referentes à aplicação da ACV para estimar os impactos ambientais da técnica de compostagem para a destinação do lodo de esgoto.

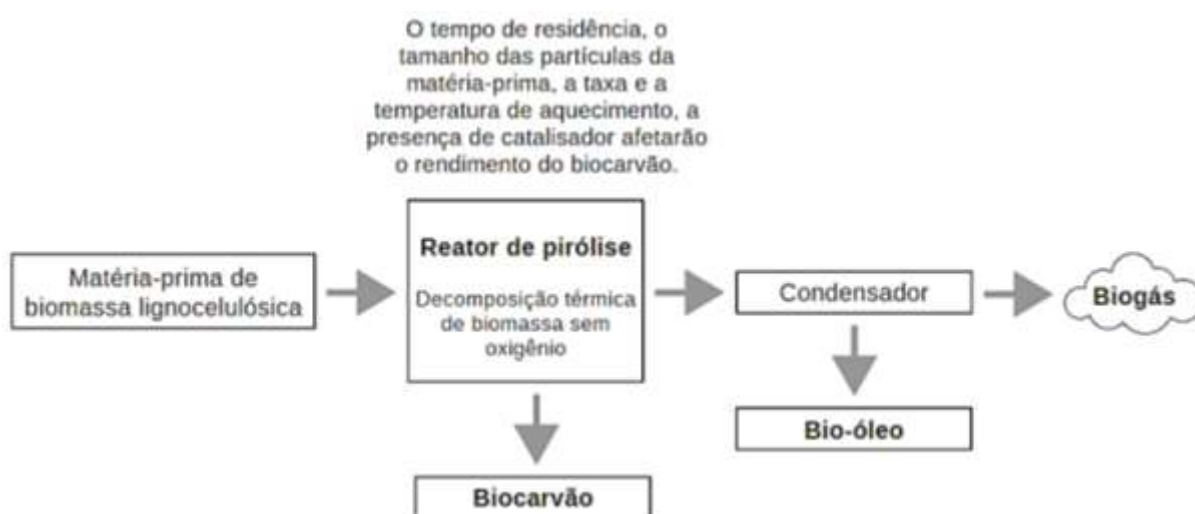
2.2.3.2 Alternativa B: Síntese de material adsorvente

Dentre as principais alternativas pesquisadas para o tratamento do lodo de ETE, destacam-se os processos térmicos, nos quais o processamento do lodo ocorre pela destruição química dos polímeros a elevadas temperaturas, sob condições controladas de temperatura, pressão, teor de oxigênio, tempo de reação, entre outros fatores (ROSA *et al.*, 2015).

O biocarvão é um dos produtos obtidos através da conversão termoquímica produzidos a partir de biomassa lignocelulósica por meio da aplicação de técnicas de conversão, incluindo a pirólise, que envolve uma série de reações complexas (LOW e YEE, 2021).

A pirólise é um processo termoquímico que, na ausência de oxigênio e por meio do aquecimento e decomposição térmica da biomassa, numa faixa de temperatura de 400°C a 1200°C, permite a conversão de biomassas em bio-óleo, biogás e um resíduo sólido denominado biocarvão - Figura 3 (LOW e YEE, 2021). A geração deste biocarvão a partir de materiais lignocelulósicos tem sido foco de pesquisas devido às propriedades físico-químicas favoráveis, decorrentes de suas características como alta porosidade, alta área superficial, renovabilidade, alta estabilidade, alto teor de carbono e baixa condutividade térmica (LOW e YEE, 2021; SEOW *et al.*, 2022).

Figura 3 - Processo de pirólise.



Fonte: Adaptado de Low e Yee (2021).

A pirólise pode ser agrupada em vários tipos de acordo com as diferentes condições de operação e as variáveis do processo. Neste sentido, a pirólise lenta é a técnica convencional, caracterizada por empregar um tempo de residência mais longo e uma taxa de aquecimento mais baixa. O longo tempo de residência permite que o vapor seja condensado ou reagido com outros produtos para formar o biocarvão. (LOW e YEE, 2021).

As ETEs produzem grandes quantidades de biomassa na forma de lodo e existem evidências crescentes e promissoras de sua valorização como matéria-prima de pirólise na literatura recente (JELLALI *et al.*, 2021). A destinação do lodo de esgoto por meio de tratamento térmico para a produção de material adsorvente (pirólise lenta do lodo em biocarvão) é apontada como uma alternativa de destinação sustentável (DEVI e SAROHA, 2017, RIBEIRO *et al.*, 2021). Essa aplicação tem se mostrado promissora, podendo gerar produtos com considerável valor agregado: o biocarvão, o bio-óleo e o biogás (JELLALI *et al.*, 2021).

Mais especificamente, a síntese de carvão ativado tem se mostrado promissora para a destinação do lodo biológico da indústria cosmética, visto que este resíduo apresenta alto teor de carbono, que favorece a conversão em material carbonáceo rico em carbono e heteroátomos, com porosidade desenvolvida e grupamentos funcionais de superfície, lhe conferindo capacidade adsorvente (MONTEIRO *et al.*, 2022).

A pirólise do lodo de esgoto permite atingir a produção de carvão que, submetido a um processo de ativação, física ou química, produz um adsorvente adequado para aplicação no próprio tratamento de águas residuárias gerador do lodo (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019). Os adsorventes à base de lodo têm sido usados para diversos fins, como por exemplo, para a remoção de metais pesados, corantes, fenóis e compostos fenólicos, fosfato e compostos diversos (DEVI e SAROHA, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2021).

A ativação química é a técnica mais empregada para ativar o biocarvão. Numerosos agentes químicos de ativação têm sido usados para manipular as propriedades da superfície do biocarvão derivado de lodo de ETE, podendo ser citados: KOH, NaOH (ativação alcalina), H₂O₂ (agente oxidante ativo), H₃PO₄ (catálise ácida) e o K₂CO₃ (SHAHIB *et al.*, 2022).

Dentre as opções mencionadas, a ativação ácida envolve a adição de substâncias ácidas no biocarvão a uma temperatura baixa, que geralmente não excede 120°C, e a reação pode levar dias. Algumas substâncias ácidas comumente usadas são o ácido fosfórico, o ácido nítrico e o ácido clorídrico (LOW e YEE, 2021).

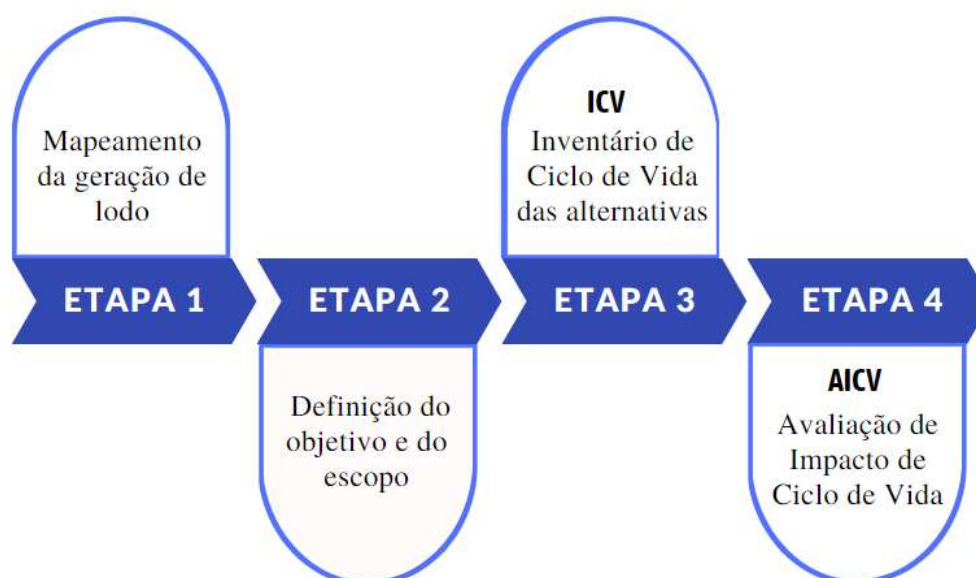
Huang *et al.*, (2022) e Tarpani *et al.*, (2020) aplicaram a ACV para investigar os impactos ambientais da pirólise do lodo de esgoto como alternativa para tratamento e destinação deste resíduo de ETE.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo segue os métodos delineados nas Normas NBR ISO 14.040/2009 e 14.044/2009 para Avaliação do Ciclo de Vida - ACV.

O estudo subdividiu-se em: (i) mapeamento da geração de lodo, (ii) definição do objetivo e escopo da avaliação de ciclo de vida, (iii) elaboração do inventário de ciclo de vida das alternativas para a destinação do lodo e (iv) realização da avaliação de impacto ambiental (Figura 4).

Figura 4 - Fluxograma da metodologia de avaliação de ciclo de vida aplicada ao estudo.



Fonte: Autora.

Os dados utilizados foram obtidos por meio de trabalho acadêmico experimental desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa (UFV), na indústria de

cosméticos capilares e corporais e na literatura científica. Estes dados coletados serviram como base para a realização dos cálculos e para a criação dos inventários.

3.1 Mapeamento do processo de geração do lodo biológico

O presente estudo foi desenvolvido com foco na destinação do lodo de esgoto gerado na ETE de uma indústria de cosméticos capilares e corporais de grande porte, situada em Minas Gerais. Atualmente, o portfólio de produtos desta indústria compreende predominantemente shampoos, produtos condicionantes (máscaras e condicionadores), óleos capilares, finalizadores e hidratantes corporais.

O processo produtivo da indústria estudada compreende, de modo geral, o fracionamento das matérias-primas, seguido da manipulação destas para a obtenção do produto acabado, a rotulagem de embalagens, o envase e o acondicionamento dos produtos, abrangendo também o controle de qualidade dos insumos (embalagens, água, matérias-primas) e dos produtos acabados.

As características das águas residuárias geradas na indústria estudada vão ao encontro das informações observadas na literatura, caracterizando-se predominantemente pela presença de surfactantes, óleos naturais e outros compostos que conferem às águas residuárias alta DQO.

As águas residuárias de origem industrial e sanitária da fábrica de cosméticos em estudo são tratadas em conjunto por processos físicos e biológicos na ETE. O sistema de tratamento dessa ETE compreende as etapas de gradeamento, equalização, tratamento anaeróbio, lodo ativado e decantação, sem demandar a dosagem de produtos químicos.

A ACV desenvolvida neste trabalho teve como foco o lodo biológico oriundo do sistema de lodo ativado da ETE. Ressalta-se que esse lodo gerado no processo de lodo ativado desagua no leito de secagem da própria ETE e, assim, perde a maior parte da umidade característica antes de ser armazenado pela indústria para a etapa de destinação.

3.2 Definição do objetivo e escopo da Avaliação do Ciclo de Vida

A avaliação do ciclo de vida realizada foi do tipo atribucional e teve como objetivo avaliar e comparar a performance ambiental de duas alternativas de

tratamento e destinação de lodo de esgoto proveniente de uma indústria de cosméticos capilares e corporais. Para atingir esse objetivo, realizou-se a comparação dos desempenhos ambientais de cada alternativa de tratamento e destinação do lodo. As informações tiveram como público-alvo a própria indústria de cosméticos, a fim de permitir a compreensão dos impactos ambientais e auxiliar na tomada de decisão no que se refere a destinar o resíduo da indústria da forma mais ambientalmente adequada possível.

Adotou-se uma fronteira de sistema da entrada na planta de tratamento/destinação do lodo até a obtenção dos produtos desejados. A construção do ICV considerou apenas as etapas de tratamento e destinação do lodo proveniente da ETE da indústria de cosméticos, não sendo apreciadas, dessa forma, informações sobre as fases de geração do lodo. Também foram desconsideradas neste estudo etapas posteriores de aplicações dos produtos obtidos a partir do lodo.

A unidade funcional (UF) escolhida, a base para a comparação entre os tratamentos e as respectivas rotas de destinação deste estudo, foi o correspondente a 1.000 kg de lodo de esgoto em base seca.

Foram consideradas duas alternativas de tratamento e destinação do lodo da ETE, sendo estas: (A) compostagem do lodo para a obtenção de composto orgânico; (B) síntese de material adsorvente (carvão ativado) a partir do lodo. Essas duas alternativas para tratamento e destinação do lodo biológico foram escolhidas para o presente trabalho uma vez que ambos os produtos gerados por meio destes métodos apresentam potenciais usos na própria indústria cosmética estudada: a aplicação do composto orgânico no solo em áreas verdes do parque industrial e o emprego do carvão ativado no tratamento das águas residuárias, objetivando assim promover a economia circular. Além disso, a compostagem é uma alternativa mundialmente consolidada (BITTENCOURT *et al.*, 2017).

As limitações deste estudo de ACV compreenderam a desconsideração dos inventários de ciclo de vida de alguns insumos (Tabela 1) e a consideração de inventários estrangeiros no uso de processos similares. A limitação referente a desconsideração de determinados insumos se deu devido à dificuldade de medição destes. Sob outra perspectiva, o uso de inventários internacionais ocorreu pela escassez de inventários desenvolvidos para processos no cenário nacional, o que

implica na inviabilidade para que alguns estudos sejam conduzidos apenas com dados brasileiros.

Os inventários foram obtidos utilizando-se o banco de dados Ecoinvent 3, edição 2020.

Tabela 1 - Insumos desconsiderados na construção dos modelos e os produtos que são afetados por estes dados.

| Insumo | Produtos afetados |
|-----------------------|------------------------------------|
| Infraestrutura | Composto orgânico / Carvão ativado |
| Equipamentos | Composto orgânico / Carvão ativado |
| Insumos | |
| Oxigênio | Composto orgânico |
| Emissões atmosféricas | |
| Vapor de água | Composto orgânico |
| Mão de obra | Composto orgânico / Carvão ativado |
| Resíduos sólidos | Composto orgânico / Carvão ativado |

Fonte: Autora.

3.3 Elaboração dos Inventários de Ciclo de Vida (ICV) das alternativas

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a fase do ICV envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo que visam quantificar as entradas e saídas identificadas como relevantes no sistema. Deste modo, os dados coletados pertinentes a cada fluxo das alternativas avaliadas foram sistematizados em planilhas eletrônicas, juntamente com os cálculos e estimativas realizados.

Os dados inventariados foram transformados em valores de massa (kg), com exceção dos dados de consumo energético, que foram contabilizados nos fluxos utilizando-se a unidade pertinente (kWh).

Por fim, na elaboração dos inventários foram buscados no banco de dados Ecoinvent 3.7.1 os fluxos que melhor representassem os processos, priorizando os inventários fundamentados na matriz energética brasileira.

Nos itens 3.3.1 e 3.3.2 são apresentados os inventários de ciclo de vida para as alternativas A e B avaliadas para o tratamento e a destinação do lodo de ETE, a compostagem do lodo para uso agrícola e a síntese de carvão ativado a partir do lodo, respectivamente.

3.3.1 Elaboração do ICV do processo de compostagem

A alternativa A para o tratamento e a destinação do lodo biológico correspondeu à compostagem para obtenção de um composto orgânico para uso agrícola.

O sistema escolhido para a compostagem do lodo foi o convencional de leira aberta. Neste estudo da leira de compostagem, optou-se pelo uso de resíduos vegetais provenientes de podas de gramas e serragem de madeira *Pinus* como materiais estruturantes. Estes materiais são comumente citados na literatura científica para tal finalidade (ASADU *et al.*, 2018; FARIA, 2018; MARTINS *et al.*, 2022); além disso, são resíduos gerados em processos internos na indústria cosmética estudada e, por isso, foram escolhidos para o presente trabalho.

Conforme mostrado na Figura 5, a fronteira do sistema compreende o processo de compostagem em leira aberta até a obtenção do produto desejado, o composto orgânico. Dessa forma, destaca-se que o lodo não carrega consigo os impactos associados da ETE da indústria.

Figura 5 - Fronteira do sistema da alternativa A - Compostagem do lodo de ETE.



Fonte: Autora.

Objetivando atender as condições ideais sugeridas na literatura para a compostagem, adotou-se a proporção carbono/nitrogênio (C/N) de aproximadamente 30:1 (ASADU *et al.*, 2018; MORSINK-GEORGALI *et al.*, 2022) para a determinação dos quantitativos dos materiais estruturantes da leira.

Os cálculos das estimativas dos demais quantitativos dos fluxos foram fundamentados considerando o período de 120 dias para o desenvolvimento completo do processo de compostagem (MARTINS *et al.*, 2022).

Conforme literatura estudada, para que a compostagem seja efetiva, é necessário controlar determinados parâmetros durante o processo. Neste sentido, a pilha de compostagem demanda ser irrigada para a manutenção do teor de umidade recomendado na literatura, na faixa de 50 a 60% (FERNANDES; SILVA, 1999). Com base em Faria (2018) e Ribeiro (2018), foi realizada a estimativa do consumo de 26.361 litros de água demandado para o processo completo, visando manter a umidade considerada ideal de acordo com a literatura científica. Além disso, para manter a condição de aerobiose e realizar a mistura dos resíduos orgânicos na leira de compostagem, foi escolhido o método de aeração por revolvedor elétrico, conforme modelo SV10 do fabricante MFRural (MFRURAL, 2022). Embasado em Faria (2018), determinou-se a periodicidade de revolvimento da leira da seguinte maneira: três vezes por semana durante os primeiros quinze dias do experimento e duas vezes por semana no período restante do processo de compostagem. Diante destas considerações, foi estimativa a demanda de energia elétrica.

O volume do produto resultante da compostagem, o composto orgânico, foi estimado com base no trabalho de Aliberti *et al.* (2019), que mensurou o percentual de redução de massa do volume de lodo e resíduos vegetais ao ser compostado.

Outro fluxo de saída considerado no inventário foi o dióxido de carbono (CO₂). Na compostagem, a taxa de emissões de CO₂ é natural e sinaliza a atividade microbiana, responsável pela degradação da matéria orgânica (YASMIN *et al.*, 2022). O cálculo estimado do quantitativo de emissões de CO₂ fundamentou-se no trabalho de Han *et al.* (2018). Todavia, é importante frisar que a escassez de dados evidenciada na literatura em relação às medições das emissões gasosas provenientes do processo de compostagem em leiras abertas configura uma imprecisão no valor estimado.

O oxigênio, elemento químico abundante na atmosfera e essencial para a respiração dos microrganismos aeróbios atuantes na compostagem, foi desconsiderado nos dados incorporados ao inventário devido à dificuldade de medição do quantitativo que seria incorporado ao processo. Ainda, foi desconsiderado no inventário o vapor de água liberado durante a compostagem, diante também da

dificuldade em medir este quantitativo de umidade emitida para a atmosfera durante o período.

Desse modo, foi obtido o inventário apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Inventário para a produção do composto considerando 1.000kg de lodo.

| Fluxo | Unid. | Quantidade | Referência |
|--------------------------|-------|------------|--|
| <i>Entradas</i> | | | |
| Lodo de ETE | kg | 1.000 | Unidade funcional |
| Serragem | kg | 4.000 | Calculado (ASADU <i>et al.</i> , 2018; MORSINK-GEORGALI <i>et al.</i> , 2022). |
| Gramma | kg | 3.000 | Calculado (ASADU <i>et al.</i> , 2018; MORSINK-GEORGALI <i>et al.</i> , 2022). |
| Água | kg | 26.361 | Estimado (FARIA, 2018; RIBEIRO, 2018) |
| Eletricidade | kWh | 149,60 | Estimado (FARIA, 2018; MFRURAL, 2022) |
| <i>Saídas</i> | | | |
| Composto orgânico | kg | 4.720 | Estimado (ALIBERTI <i>et al.</i> , 2019) |
| Dióxido de carbono (CO2) | kg | 5.075,76 | Estimado (HAN <i>et al.</i> , 2018) |

Fonte: Autora.

Os fluxos considerados no ICV referente à compostagem do lodo são apresentados na Tabela 3, bem como seus respectivos processos no banco de dados.

Tabela 3 - Fluxos considerados no modelo para a compostagem e seu respectivo processo no banco de dados.

| Categoria | Fluxo | Processo no Banco de Dados (Ecoinvent 3.7.1) |
|-----------------------|--------------------------|---|
| <i>Entradas</i> | | |
| Insumos | Lodo de ETE | Processo criado pela autora |
| | Gramma | Processo criado pela autora |
| | Serragem de madeira | Processo criado pela autora |
| Manutenção da umidade | Água | Tap water production, conventional treatment tap water APOS, U - BR |
| Energia | Eletricidade | market for electricity low voltage electricity, low voltage APOS, U - BR-South-eastern grid |
| <i>Saídas</i> | | |
| Produto | Composto orgânico | Processo criado pela autora |
| Emissão atmosférica | Dióxido de carbono (CO2) | Carbon dioxide, from soil or biomass stock Emission to air / unspecified |

Fonte: Autora.

3.3.2 Elaboração do ICV do processo de síntese de carvão ativado

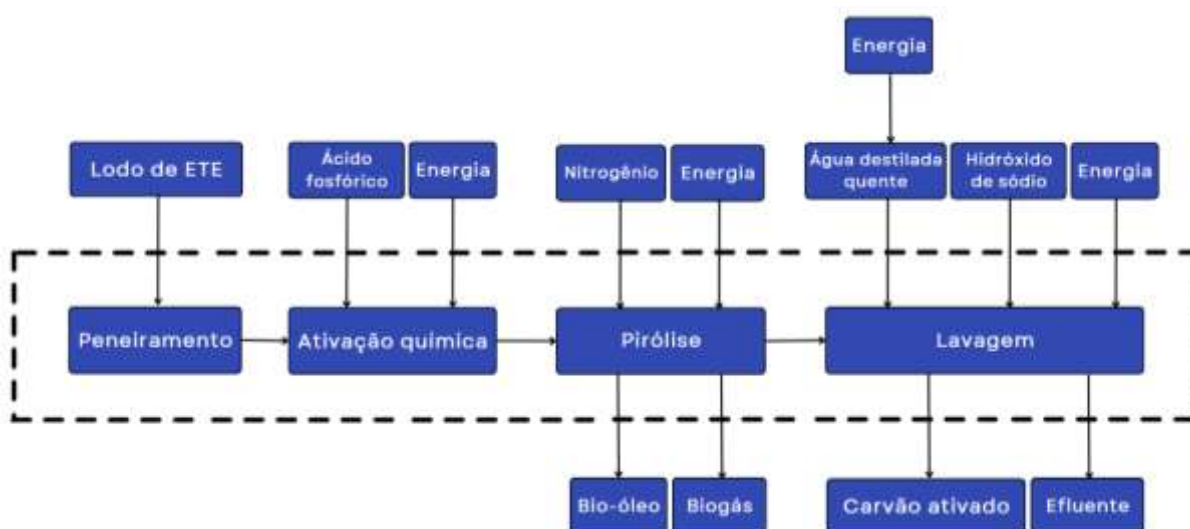
A alternativa B estudada foi a síntese de carvão ativado (CA) a partir do lodo biológico da indústria cosmética.

Os dados para a elaboração do ICV foram extraídos do trabalho de Monteiro *et al.* (2022), que conduziram o experimento usando o mesmo lodo biológico da indústria de cosméticos foco do presente trabalho.

O carvão ativado foi obtido através do processo de pirólise lenta, por ativação química com ácido fosfórico (H_3PO_4) e, em seguida, o material foi pirolisado. Neste processo, houve a geração de bio-óleo e biogás, além do produto almejado, o carvão ativado, que seguiu para a etapa final de lavagem com água destilada quente e hidróxido de sódio (NaOH) (MONTEIRO *et al.*, 2022).

Conforme exibido na Figura 6, a fronteira do sistema inicia com o preparo do lodo biológico e finaliza com a obtenção do carvão ativado, passando pelas etapas de ativação química, pirólise e lavagem do carvão. Idem à fronteira da alternativa A, enfatiza-se que não foram considerados os impactos associados à geração do lodo na ETE.

Figura 6 - Fronteira do sistema da alternativa B - Síntese de material adsorvente a partir de lodo de ETE.



Fonte: Autora.

Os quantitativos do ICV foram equalizados para a unidade funcional deste trabalho a partir dos valores medidos por Monteiro *et al.* (2022). As frações contidas no biogás gerado no processo foram estimadas de acordo com o experimento de Rocha *et al.* (2020). A Tabela 4 apresenta o ICV elaborado.

Tabela 4 - Inventário para a síntese de carvão ativado considerando 1.000kg de lodo.

| Fluxo | Unid. | Quantidade | Referência |
|---|----------------|------------|---|
| Entradas | | | |
| Lodo de ETE | kg | 1.000 | Unidade funcional |
| Ácido fosfórico (H ₃ PO ₄) | kg | 1.000 | Calculado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Nitrogênio | kg | 80.830 | Calculado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Água destilada | kg | 10.000 | Calculado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Solução de hidróxido de sódio (NaOH) | kg | 5.000 | Calculado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Eletricidade | kWh | 5.817,30 | Calculado (EXAUSTERMO, 2023; LUCADAMA, 2023; MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Saídas | | | |
| Carvão ativado | kg | 600 | Calculado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Bio-óleo | kg | 130 | Calculado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Efluente | m ³ | 15 | Calculado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022) |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | kg | 136,34 | Estimado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022; ROCHA <i>et al.</i> , 2020) |
| Monóxido de carbono (CO) | kg | 23,16 | Estimado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022; ROCHA <i>et al.</i> , 2020) |
| Metano (CH ₄) | kg | 18,17 | Estimado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022; ROCHA <i>et al.</i> , 2020) |
| Biogás (outros) | kg | 92,33 | Estimado (MONTEIRO <i>et al.</i> , 2022; ROCHA <i>et al.</i> , 2020) |

Fonte: Autora.

Os fluxos considerados no ICV referente à síntese de carvão ativado são apresentados na Tabela 5, assim como seus respectivos processos no banco de dados.

Tabela 5 - Fluxos considerados no modelo para a síntese de material adsorvente e seu respectivo processo no banco de dados.

| Categoria | Fluxo | Processo no Banco de Dados (Ecoinvent 3.7.1) |
|------------------|-------------------------------|--|
| Entradas | | |
| Insumos | Lodo de ETE | Processo criado pela autora |
| Ativação química | Ácido fosfórico | Market for phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state APOS, U – GLO phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state |
| Pirólise | Nitrogênio | Market for nitrogen, liquid nitrogen, liquid APOS, U - RoW |
| Lavagem | Água destilada | Water production, deionised water, deionised APOS, U - RoW |
| | Solução de Hidróxido de Sódio | Market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state APOS, U – RoW |
| Energia | Eletricidade | market for electricity low voltage electricity, low voltage APOS, U - BR-South-eastern grid |

| <i>Saídas</i> | | |
|---------------|---------------------------------------|---|
| Produto | Carvão ativado | Processo criado pela autora |
| Efluente | Efluente | Processo criado pela autora |
| | Bio-óleo | Processo criado pela autora |
| Resíduos | Monóxido de carbono (CO) | Carbon monoxide, from soil or biomass stock Emission to air / unspecified |
| | Dióxido de carbono (CO ₂) | Carbon dioxide, from soil or biomass stock Emission to air / unspecified |
| | Metano (CH ₄) | Methane, from soil or biomass stock Emission to air / unspecified |
| | Biogás | Processo criado pela autora |

Fonte: Autora.

3.4 Realização da Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

Esta etapa compreendeu a avaliação de impactos de ciclo de vida dos sistemas de produtos modelados no OpenLCA versão 1.11, na interpretação dos respectivos resultados e comparação com a literatura consultada.

Os impactos ambientais gerados para os processos de tratamento e destinação do lodo industrial foram caracterizados e normalizados utilizando-se o método *ReCiPe 2016 Midpoint (H)*, adotando-se as seguintes categorias de impacto: aquecimento global; destruição do ozônio estratosférico; consumo de água; esgotamento de recursos fósseis, esgotamento de recursos minerais; acidificação terrestre; ecotoxicidade terrestre; toxicidade humana não cancerígena; toxicidade humana cancerígena; formação de material particulado; eutrofização de água doce (MENDES *et. al.*, 2016).

Essa metodologia de avaliação de impacto e as categorias de impacto citadas são comuns para estudos de ACV aplicados à destinação de lodo de ETE (HUANG *et al.*, 2022; MORSINK-GEORGALI *et al.*, 2022; TARPANI *et al.*, 2020), sendo assim as mais convenientes para a comparação com e entre estudos da literatura.

Ressalta-se que o método *ReCiPe Midpoint (H)* possui 18 categorias de impacto, no entanto, algumas delas, como ecotoxicidade marinha e radiação ionizante, não foram consideradas por não serem recorrentes em estudos de impacto ambiental relacionados à área de aplicação.

Diante dos resultados obtidos, foi possível analisar e comparar as diferentes categorias de impacto consideradas para as alternativas A e B de destinação do lodo biológico de ETE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A carência de estudos que quantifiquem os impactos ambientais de alternativas de tratamento e destinação de lodo de ETE gera a demanda de se investigar o perfil ambiental das opções para a tomada de decisão na indústria.

4.1 Comparação entre os impactos das alternativas de destinação do lodo

Os resultados obtidos através do OpenLCA por categoria de impacto ambiental para as alternativas A e B avaliadas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de cada categoria de impacto para as alternativas A e B.

| Categoria de impacto | Unidade | Alternativa A (Compostagem) | Alternativa B (Síntese de adsorvente) |
|-------------------------------------|-------------------------|--|--|
| Aquecimento global | kg CO ₂ eq | 5.087,01 | 44.806,27 |
| Ecotoxicidade terrestre | kg 1,4-DCB | 188,03 | 43.798,73 |
| Toxicidade humana não cancerígena | kg 1,4-DCB | 27,72 | 22.344,60 |
| Consumo de água | m ³ | 26,87 | 1.312,58 |
| Esgotamento de recursos fósseis | kg óleo eq | 2,89 | 11.108,15 |
| Toxicidade humana cancerígena | kg 1,4-DCB | 1,95 | 3.288,72 |
| Esgotamento de recursos minerais | kg Cu eq | 0,13 | 83,48 |
| Acidificação terrestre | kg SO ₂ eq | 0,05 | 201,93 |
| Formação de material particulado | kg PM _{2.5} eq | 0,02 | 113,54 |
| Eutrofização de água doce | kg P eq | 0,01 | 20,70 |
| Destruição de ozônio estratosférico | kg CFC11 eq | 9.68E-6 | 0,02 |

Fonte: Autora.

Ao comparar os valores de cada categoria de impacto referentes às alternativas A (compostagem) e B (síntese de adsorvente), é possível constatar que a alternativa B apresentou níveis de impacto ambiental muito superiores à alternativa A em todas as categorias analisadas. Os resultados obtidos revelaram que o impacto ambiental da compostagem representou entre 0,02% e 11,35% do impacto do processo de síntese de carvão ativado, nas categorias avaliadas. Portanto, a compostagem do lodo é, dentre as alternativas estudadas de tratamento e destinação deste resíduo da ETE, a opção com menores impactos ambientais adversos associados.

Este resultado comparativo é coerente, visto que a compostagem é um processo simples, que corresponde ao que ocorre naturalmente nos ecossistemas, com a diferença de que nestes a decomposição da matéria orgânica de origem vegetal e animal ocorre em prazo indeterminado, pois depende das condições do meio em que se encontra. Assim, a compostagem é considerada uma técnica que imita os processos naturais (SCHALCH *et al.*, 2015). Por outro lado, a síntese de material adsorvente a partir do lodo de ETE compreende um número superior de processos, demandando um maior e mais variado volume de insumos, quando comparado ao processo de compostagem, mais natural e simplificado.

No entanto, é importante destacar que o processo de compostagem do lodo, apesar de apresentar menores impactos ambientais negativos correlacionados, gera somente o composto orgânico, um produto de menor valor agregado destinado ao enriquecimento dos solos, que fornece nutrientes capazes de melhorar o desenvolvimento vegetal. Em contrapartida, o processo de síntese de material adsorvente é gerador do carvão ativado, um produto com maior valor agregado que vem sendo alvo de inúmeras pesquisas referentes às suas aplicações nos segmentos da agricultura, meio ambiente e energia (JELLALI *et al.*, 2021). Neste contexto, merece destaque o uso do carvão ativado como material adsorvente alternativo para a remoção de diversos contaminantes presentes em águas residuárias e efluentes gasosos (KULMAN, 2019; SEOW *et al.*, 2022).

Ainda, além do produto principal almejado na alternativa B, o carvão ativado, o processo de pirólise empregado é gerador de outros dois subprodutos, o bio-óleo e o biogás, combustíveis de significativo valor agregado. Assim, os produtos gerados no processo da alternativa B, que compreendem o carvão ativado, o bio-óleo e o biogás, podem competir os impactos adversos totais do processo de fabricação, que são superiores aos impactos provenientes da alternativa A.

Nesta perspectiva, salienta-se que ambos os produtos de interesse deste estudo, o composto orgânico e o carvão ativado, mostram relevantes usos no contexto da economia circular dentro da própria indústria de cosméticos foco deste trabalho. Apesar disso, o carvão ativado revela um maior número de aplicações e valorização no mercado de modo geral, tendo em vista o seu potencial de solucionar problemas ambientais mais complexos, o que reduziria a carga ambiental de seu processo de síntese. Dessa forma, a aplicação do carvão ativado pode minimizar ou evitar que

outros impactos ambientais mais significativos ocorram, como por exemplo, uma necessidade de dosagem de produtos químicos para a remoção de contaminantes presentes em águas residuárias na ETE.

Diante do exposto, compreende-se que a escolha da melhor alternativa para o tratamento e a destinação do lodo biológico da ETE, dentre as opções A e B avaliadas, está subordinada aos maiores desafios enfrentados pela indústria. Logo, cabe aos gestores uma análise holística da realidade de cada planta industrial para apontar qual produto resultante do processo de tratamento do lodo apresentará o potencial de solucionar os desafios vivenciados e, conseqüentemente, a melhor alternativa de destinação do resíduo da ETE.

4.2 Comparativo de impacto ambiental com a literatura

Os resultados de impacto ambiental alcançados neste trabalho foram comparados brevemente com os de outros da literatura para cada categoria de impacto avaliada para contextualizar se os valores se enquadram nas faixas antecipadas.

Observou-se que os estudos de ACV de alternativas de tratamento e destinação de lodo de ETE são escassos na literatura e que os resultados destes estudos variam muito devido às diferenças de metodologias aplicadas.

Destaca-se que todos os trabalhos comparados da literatura utilizaram a mesma unidade funcional do presente estudo, correspondente a 1.000 kg de lodo em base seca.

4.2.1 Alternativa A – Compostagem

Os impactos ambientais obtidos relacionados ao tratamento e à destinação final do lodo através da compostagem (alternativa A) foram comparados, para cada categoria, a resultados de trabalhos anteriores da literatura, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo de resultados por categorias de impacto da alternativa A com a literatura.

| Categoria de impacto | Unidade | Alternativa A | Morsink-Georgali <i>et al.</i> (2022) | Tarpani <i>et al.</i> (2020) |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|-------------------------------------|
| Aquecimento global | kg CO ₂ eq | 5.087,01 | 786 | 197,00 |
| Ecotoxicidade terrestre | kg 1,4-DCB | 188,03 | 1,04 | 0,62 |
| Toxicidade humana não cancerígena | kg 1,4-DCB | 27,72 | 48,40 | 71,50 |
| Consumo de água | m ³ | 26,87 | - | 431,00 |
| Esgotamento de recursos fósseis | kg óleo eq | 2,89 | - | 57,30 |
| Toxicidade humana cancerígena | kg 1,4-DCB | 1,95 | - | - |
| Esgotamento de recursos minerais | kg Cu eq | 0,13 | - | - |
| Acidificação terrestre | kg SO ₂ eq | 0,05 | 3,96 | 0,70 |
| Formação de material particulado | kg PM _{2.5} eq | 0,02 | - | 0,43 |
| Eutrofização de água doce | kg P eq | 0,01 | 0,22 | 0,02 |
| Destrução de ozônio estratosférico | kg CFC11 eq | 9.68E-6 | 5.85E-7 | 1.61E-5 |

Fonte: Autora.

Observa-se que os trabalhos encontrados na literatura apresentaram valores de impactos distintos, sendo bastante variáveis para as categorias analisadas, quando comparados aos resultados obtidos para a alternativa A do presente estudo.

No entanto, ressalta-se que a definição rigorosa dos limites do sistema exerce um impacto significativo na ACV e os estudos encontrados na literatura compreendiam uma fronteira do sistema mais abrangente, considerando, por exemplo, a fase de aplicação agrícola após a realização do processo de compostagem (TARPANI *et al.*, 2020) ou envolvendo etapas adicionais ao processo, como triagem, trituração e espessamento dos insumos da compostagem (MORSINK-GEORGALI *et al.*, 2022). Todavia, o presente trabalho considerou o início da fronteira do sistema a partir da entrada dos materiais na pilha de compostagem, portanto, sem carregar os impactos provenientes dos processos de geração destes e sendo estes considerados resíduos da indústria, ou seja, passivos ambientais que necessitavam de uma destinação. Ainda, o fim da fronteira do sistema foi delimitado na obtenção do composto orgânico, não sendo mensurado também o impacto ambiental de sua aplicação no solo.

É importante ressaltar também que os resultados dos trabalhos da literatura expostos na Tabela 7 foram obtidos por meio da utilização do software GaBi, ferramenta distinta da considerada neste estudo (OpenLCA) para a modelagem da

ACV e estimativa dos impactos ambientais. Além disso, o trabalho de Morsink-Georgali *et al.* (2022) aplicou o método CML 2001 para a AICV; em contrapartida, neste estudo e no trabalho de Tarpani *et al.* (2020) foram aplicados o método ReCiPe.

Outro fator a ser considerado para a diferença dos valores de impacto ambiental obtidos e os encontrados na literatura é a questão regional. Os estudos de Morsink-Georgali *et al.* (2022) e de Tarpani *et al.* (2020) foram desenvolvidos na Europa, enquanto o presente estudo buscou priorizar o uso de inventários com dados voltados para o cenário nacional. Diante disso, é provável que tenha havido uma variação nos valores de dados dos inventários nos diferentes trabalhos citados devido ao fator regional.

4.2.2 Alternativa B – Síntese de material adsorvente

Da mesma forma, os resultados de impacto ambiental alcançados para o tratamento e a destinação final do lodo por meio da pirólise para a obtenção do carvão ativado (alternativa B) foram comparados aos valores de trabalhos anteriores da literatura, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparativo de resultados por categorias de impacto da alternativa B com a literatura.

| Categoria de impacto | Unidade | Alternativa B | Huang <i>et al.</i> (2022) | Tarpani <i>et al.</i> (2020) |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Aquecimento global | kg CO ₂ eq | 44.806,27 | 2.400,00 | 446,50 |
| Ecotoxicidade terrestre | kg 1,4-DCB | 43.798,73 | 3.050,00 | 0,26 |
| Toxicidade humana não cancerígena | kg 1,4-DCB | 22.344,60 | 2.700.000,00 | 67,45 |
| Consumo de água | m ³ | 1.312,58 | 231,00 | 279,50 |
| Esgotamento de recursos fósseis | kg óleo eq | 11.108,15 | 412,00 | 181,00 |
| Toxicidade humana cancerígena | kg 1,4-DCB | 3.288,72 | 180,00 | - |
| Esgotamento de recursos minerais | kg Cu eq | 83,48 | 57,20 | - |
| Acidificação terrestre | kg SO ₂ eq | 201,93 | 29,10 | 0,50 |
| Formação de material particulado | kg PM _{2.5} eq | 113,54 | 10,50 | 0,29 |
| Eutrofização de água doce | kg P eq | 20,70 | 0,78 | 0,02 |
| Destruição de ozônio estratosférico | kg CFC11 eq | 0,02 | 0,01 | 5.77E-5 |

Fonte: Autora.

Percebe-se que os valores de impacto ambiental encontrados em trabalhos anteriores na literatura científica para praticamente a totalidade das categorias avaliadas são inferiores aos alcançados neste trabalho. Porém, embora estes estudos de ACV também tenham mensurado os impactos ambientais da pirólise de lodo de ETE, verifica-se que diferentes metodologias foram aplicadas.

O trabalho de Tarpani *et al.* (2020) não considerou no ICV o impacto ambiental dos reagentes necessários para produzir o carvão ativado, sendo que o uso de reagentes químicos tem efeitos sobre a carga ambiental dos processos de produção de CA (HUANG *et al.*, 2022).

Além disso, ao realizar a comparação da metodologia aplicada neste trabalho com aquelas consideradas por Huang *et al.* (2022) e Tarpani *et al.* (2020), nota-se que foram incorporados por estes autores métodos de recuperação de energia. Tarpani *et al.* (2020) assumiram que o biogás gerado durante a pirólise seria utilizado como combustível substituto para efeitos de aquecimento no sistema, sendo assim creditado no levantamento de dados. A produção de alcatrão e o carvão também foram creditados em quantitativos equivalentes de combustíveis no ICV. Huang *et al.* (2022) consideraram a recuperação de energia por meio de aplicações de produtos da síntese. Mais especificamente, a eletricidade gerada e o calor recuperado, estimados por simulação, foram contabilizados como créditos energéticos junto ao processo. Assim, entende-se que os impactos ambientais alcançados neste trabalho também seriam inferiores, para a maior parte das categorias de impacto, caso tivesse sido considerado o aproveitamento energético do bio-óleo e do biogás gerados no processo de pirólise.

Já a síntese de CA desenvolvida por Monteiro *et al.* (2022), fonte de dados para a elaboração do ICV da alternativa B deste trabalho, foi realizada em um reator de pirólise laboratorial, dentro de um ambiente totalmente controlado. Em seguida, a metodologia aplicada nesta avaliação contabilizou todos os insumos necessários ao processo e, em seguida, foram estimados os quantitativos adequados à unidade funcional escolhida, considerando como aplicáveis os mesmos procedimentos numa situação de aplicação real do processo na indústria.

Diante do exposto, constata-se que é pertinente que os valores de impactos ambientais apresentados na literatura estudada sejam, em sua maior parte, inferiores aos obtidos na alternativa B avaliada deste trabalho.

Reforça-se que os resultados alcançados por Tarpani *et al.* (2020), expostos na Tabela 8, apesar de ter utilizado o mesmo banco de dados, o Ecoinvent (versão 2.2), foram obtidos no software GaBi 6.0, ferramenta distinta da considerada neste estudo e no trabalho de Huang *et al.* (2022), nos quais foi utilizado o OpenLCA para a modelagem da ACV e estimativa dos impactos ambientais.

Assim como os trabalhos encontrados na literatura para a alternativa A avaliada, outro contexto a ser ponderado para a diferença dos valores de impacto ambiental obtidos e os encontrados na literatura é a questão regional. Os estudos de Huang *et al.* (2022) e Tarpani *et al.* (2020) foram desenvolvidos na Europa e na América do Norte, respectivamente, enquanto o presente estudo buscou priorizar o uso de inventários com dados voltados para o cenário nacional. Com isso, é provável que houve também uma variação nos valores de dados dos inventários nos diferentes trabalhos citados devido ao fator regional.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesse estudo, o impacto ambiental associado a duas alternativas para o tratamento e a destinação do lodo biológico de ETE de indústria de cosméticos foi calculado e comparado por meio da metodologia de avaliação de ciclo de vida. Constatou-se que a alternativa de compostagem do lodo para obtenção de composto orgânico para uso agrícola apresentou menor impacto ambiental quando comparada à segunda alternativa, a síntese de material adsorvente, o carvão ativado. No entanto, avalia-se que, apesar de causar maiores impactos sobre o meio ambiente, os produtos gerados no processo de pirólise do carvão possuem maior valor agregado no mercado e são capazes de solucionar problemas ambientais mais desafiadores em diversas aplicações, com destaque para a remoção de contaminantes no tratamento de águas residuárias.

Com isso, tem-se que as principais contribuições desse trabalho são:

- i. oferecer uma compreensão mais significativa dos impactos ambientais de alternativas de tratamento e destinação de lodo biológico de ETE de indústria de cosméticos corporais e capilares no Brasil;
- ii. apresentar o perfil ambiental de duas alternativas para a destinação de lodo biológico de ETE industrial (compostagem para uso agrícola e síntese de material adsorvente), ainda pouco exploradas em outros estudos na literatura de avaliação de ciclo de vida;
- iii. subsidiar a tomada de decisão dos gestores da indústria no que se refere à destinação do lodo biológico de ETE.

Recomenda-se, para trabalhos futuros:

- i. análise econômica dos cenários estudados para o tratamento e a destinação do lodo biológico.
- ii. expansão da fronteira do sistema da alternativa A estudada, a compostagem do lodo biológico, abrangendo as etapas de preparação dos insumos para a compostagem.

REFERÊNCIAS

AREIAS, I.O.R; MANHÃES, R.S.T; COLORADO, H.A; RODRÍGUEZ, R.J.S; SOUZA, D; MONTEIRO, S.N; VIEIRA, C.M.F. Recycling of sewage treatment plant (STP) waste in red ceramics. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 23, p. 53-63. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS - ABIHPEC. **Vendas de HPPC crescem 4,7% em 2020 e totalizam R\$ 122,4 bilhões**. 2021. Disponível em: <<https://abihpec.org.br/vendas-de-hppc-crescem-47-em-2020-e-totalizam-r-1224-bilhoes/>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13591 – Compostagem**. Rio de Janeiro. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro. 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro. 2009b.

ALIBERTI, E.A; PRATES, K.V.M.C; MARTINS, F.F; PEREZ, R.B.G; BOSCO, T.C.D. Eficiência da compostagem de lodo de laticínios quando submetido à compostagem com grama e poda de árvores. **VII Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia**. Londrina, PR. 2019.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. Cap. 8. p. 317 -395.

ASADU, C.O; ANEKE, N.G; EGBUNA, S.O; AGULANNA, A.C. Comparative studies on the impact of bio-fertilizer produced from agro-wastes using thermo-tolerant actinomycetes on the growth performance of Maize (*Zea-mays*) and Okro (*Abelmoschus esculentus*). **Environmental Technology & Innovation**. Vol. 12, p.55-71. 2018.

BAGHERI, M; BAUER, T; BURGMAN, L.E; WETTERLUND, E. Fifty years of sewage sludge management research: Mapping researchers' motivations and concerns. **Journal of Environmental Management**. Vol. 325, 116412. 2023.

BITTENCOUT, S. AISSE, M.M. SERRAT, B.M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: Estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol. 22, n.6, p.1129-1139. 2017.

BREDA, C.C; SOARES, M.B; TAVANTI, R.F.R; VIANA, D.G; FREDDI, O.S; PIEDADE, A.R; MAHL, D; TRABALLI, R.C; GUERRINI, I.A. Successive sewage sludge

fertilization: Recycling for sustainable agriculture. **Waste Management**. Vol. 109, p. 38-50. 2020.

COLLIVIGNARELLI, M.C; CANATO, M; ABBÀ, A; MIINO, M.C. Biosolids: What are the different types of reuse? **Journal of Cleaner Production**. Vol. 238, 117844. 2019.

DEVI, P; SAROHA, A.K. Utilization of sludge based adsorbents for the removal of various pollutants: A review. **Science of the Total Environment**. Vol. 578, p. 16-33. 2017.

DING, E; ZHANG, R; NGO, H.H; HE, X; MA, J; NAN, J; LI, G. Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review. **Science of The Total Environment**. Vol. 769, 144451. 2021.

FARIA, M.F. **Compostagem de lodo de esgoto e indicadores de patogenicidade**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp Botucatu, SP, 2018.

EXAUSTERMO. **Forno mufla industrial tratamento térmico 325 litros**. Disponível em: <<https://www.exaustermo.com.br/forno-mufla-industrial-325-litros>>.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. da. **Manual prático para compostagem de bioossólidos**. Londrina: UEL - Universidade Estadual de Londrina, 1999. 91 p.

FERREIRA, A; FAGNANI, K.C; ALVES, H.J; COLPINI, L.M.S; KUNH, S.S; NASTRI, S; CONSERVA, L.R.S; MELCHIADES, F.G. Effect of incorporating sludge from poultry slaughterhouse wastewater treatment system in ceramic mass for tile production. **Environmental Technology & Innovation**. Vol. 9, p. 294-302. 2018.

GEORGALI, P.Z.M; KYLILI, A; FOKAIDES, P.A; PAPADOPOULOS, A.M. Compost versus biogas treatment of sewage sludge dilemma assessment using life cycle analysis. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 350, 131490. 2022.

GHERGHEL, A. TEODOSIU, C. GISI, S. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 228, p. 244-263. 2019.

GUTIERREZ, K.G. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. 2014. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais.

HAN, Z; SUN, D; WANG, H; LI, R; BAO, Z; QI, F. Effects of ambient temperature and aeration frequency on emissions of ammonia and greenhouse gases from a sewage sludge aerobic composting plant. **Bioresource Technology**. Vol. 270, p.457-466. 2018.

HUANG, C; MOHAMED, B.A; LI, L.Y. Comparative life-cycle assessment of pyrolysis processes for producing bio-oil, biochar, and activated carbon from sewage sludge. **Resources, Conservation & Recycling**. Vol. 181, 106273. 2022.

JELLALI, S; KHIARI, B; USMAN, M; HAMDY, H; CHARABI, Y; JEGUIRIM, M. Sludge-derived biochars: A review on the influence of synthesis conditions on pollutants removal efficiency from wastewaters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 144, 2021.

KULMAN, R.X. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado a partir de lodo de Estação de Tratamento de Água**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, RS, 2019.

LIM, S.L; LEE, L.H; WU, T.Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 11, p.262-278. 2016.

LIU, Y; LIN, R; REN, J. Developing a life cycle composite footprint index for Sustainability prioritization of sludge-to-energy alternatives. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 281, 124885. 2021.

LOW, Y.W; YEE, K.F. A review on lignocellulosic biomass waste into biochar-derived catalyst: Current conversion techniques, sustainable applications and challenges. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 154. 2021.

LUCADEMA SOLUÇÕES PARA LABORATÓRIO. **Estufa de esterilização e secagem 528L – Modelo LUCA-80/528**. Disponível em: <<https://www.lucadema.com.br/produtos/detalhe/116/54/Estufa-de-Esterilizacao-e-Secagem-Modelo-Luca-80-1000>>.

MARTINS, G.A; CORRÊA, L.B; GUIDONI, L.L.C; LUCIA Jr., T; GERBER, M.D; SILVA Jr., F.M.R; CORRÊA, E.K. Toxicity and physicochemical parameters of composts including distinct residues from agribusiness and slaughterhouse sludge. **Waste Management**. Vol. 138, p.75-82. 2022.

MELO, E.D; MOUNTEER, A.H; LEÃO, L.H.S; BAHIA, R.C.B; CAMPOS, I.M.F. Toxicity identification evaluation of cosmetics industry wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 244-245, p.329-334. 2013.

MENDES, N.C; BUENO, C; OMETTO, A.R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**. Vol. 26, p.160-175. 2016.

MFRURAL. **Revolvedor de compostagem modelo SV10**. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/detalhe/601307/revolvedor-de-compostagem-modelo-sv10>>.

MISHRA, S.K. YADAV, K. Assessment of the effect of particle size and selected physico-chemical and biological parameters on the efficiency and quality of composting of garden waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 10, 107925. 2022.

MONTEIRO, K.A; MOUNTEER, A.H; MOREIRA, R.P.L; SILVA, A.A.S. FERREIRA, J.P.R. Reaproveitamento de lodo biológico industrial para síntese de material

adsorvente e tratamento terciário de esgoto doméstico. **XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - Uberlândia / MG. 2022.**

MORSINK-GEORGALI, P; KYLILI, A; FORAIDES, P.A; PAPADOPOULOS, A.M. Compost versus biogas treatment of sewage sludge dilemma assessment using life cycle analysis. **Journal of Cleaner Production.** Vol. 350, 131490. 2022.

OLIVEIRA, A.G; BARROS, A.D; LUCENA, L.C.F.L; LUCENA, A.E.F.L; PATRICIO, J.D. Evaluation of calcined textile sludge as a stabilizing material for highway soil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering.** Vol. 7, p. 688-699. 2020.

PEREIRA, I.S; BAMBERG, A.L; SOUZA, R.O; MONTEIRO, A.B; MARTINAZZO, R; SILVEIRA, C.A.P; SILVEIRA, A.O. Agricultural use and pH correction of anaerobic sewage sludge with acid pH. **Journal of Environmental Management.** Vol. 275, 111203. 2020.

RIBEIRO, L.C. **Compostagem de lodo de esgoto: Caracterização e bioestabilização.** 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp Botucatu, SP, 2018.

RIBEIRO, M.R; GUIMARÃES, Y.M; SILVA, I.F; ALMEIDA, C.A; SILVA, M.S.V; NASCIMENTO, M.A; SILVA, U.P; VAREJÃO, E.V; RENATO, N.S; TEIXEIRA, A.P.C; LOPES, R.P. Synthesis of value-added materials from the sewage sludge of cosmetics industry effluent treatment plant. **Journal of Environmental Chemical Engineering.** Vol. 9, Ed. 4. 2021.

ROCHA, D.N; BARBOSA, E.G; RENATO, N.S; VAREJÃO, E.V.V; SILVA, U.P; ARAUJO, M.E.V; MARTINS, M.A. Improving biofuel production by thermochemical conversion of defatted *Scenedesmus obliquus* biomass. **Journal of Cleaner Production.** Vol. 275, 124090. 2020

ROSA, A.P; CHERNICHARO, C.A.L; LOBATO, L.C.S; SILVA, R.V; PADILHA, R.F; BORGES, J.M. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. **Renewable Energy.** Vol. 124, p. 21-26. 2018.

ROSA, A.P; CHERNICHARO, C.A.L; MELO, G.C.B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. **Revista DAE.** 2015.

SÁNCHEZ, Ó. J; OSPINA, D. A; MONTOYA, S. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. **Waste Management.** Vol. 69, p.136-153. 2017.

SCHALCH, V; MASSUKADO, L.M; BIANCO, C.I. Compostagem. Recursos d solo: Propriedades e usos. 1ª Edição. São Carlos: Editora Cubo. 2015, p. 633-656.

SCOTON, E.J; BATTISTELLE, R.A.G; BEZERRA, B.S; AKUTSU, J. A sewage sludge co-composting process using respirometric monitoring method in hermetic rotary reactor. **Journal of Cleaner Production.** Vol. 121, p. 169-175. 2016.

SEOW, Y.X; TAN, Y.H; MUBARAK, N; CANSEDO, G; KHALID, M; IBRAHIM, L; GHASEMI, M. A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Vol. 10, 107017. 2022.

SILVA, A.P.M; BARROS, R.M; LORA, E.E.S; FLÓREZ, C.A.D; SANTOS, I.F.S; CRISPIM, A.M.C; RENÓ, M.L.G. Characterization and evaluation of the life cycle of energy use from drying bed sludge. **Energy**. Vol. 263, 125630. 2023.

SHAHIB, I.I; IFTHIKAR, J; OYEKUNLE, D.T; ELKHLIFI, Z; JAWARD, A; WANG, J; LEI, W; CHEN, Z. Influences of chemical treatment on sludge derived biochar; Physicochemical properties and potential sorption mechanisms of lead (II) and methylene blue. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Vol. 10. 2022.

TARPANI, R.R.Z; ALFONSÍN, C; HOSPIDO, A; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of sewage sludge treatment methods for resource recovery considering ecotoxicity of heavy metals and pharmaceutical and personal care products. **Journal of Environmental Management**. Vol. 260, 109643. 2020.

VISENTIN, R. **Viabilidade econômica da compostagem de lodo de esgoto para fins agrícolas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Unesp Botucatu, SP, 2019.

XU, Z; MA, Y; ZHANG, L; HAN, Y; YUAN, J; LI, G; LUO, W. Relating bacterial dynamics and functions to gaseous emissions during composting of kitchen and garden wastes. **Science of the Total Environment**. Vol. 767, 1442 10. 2021.

YASMIN, N; JAMUDA, M; PANDA, A.K; SAMAL, K; NAYAK, J.K. Emission of greenhouse gases (GHGs) during composting and vermicomposting: Measurement, mitigation, and perspectives. **Energy Nexus**. Vol. 7, 10092. 2022.

ZAT, T; BANDIEIRA, M; SATTLER, N; SEGADÃES, A.M; CRUZ, R.C.D; MOHAMED, G; RODRÍGUES. Potential re-use of sewage sludge as a raw material in the production of eco-friendly bricks. **Journal of Environmental Management**. Vol. 297, 113238. 2021.