

II-1220 - ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICO-FINANCEIRA DE ALTERNATIVAS DE GERENCIAMENTO DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Indiara Cardoso Guasti⁽¹⁾

Engenheira Química pela UCL – Faculdade do Centro Leste. Mestranda em Engenharia Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Felipe Sombra dos Santos⁽²⁾

Engenheiro Químico pela PUC-Rio. Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais na área de Engenharia de Processos e Meio Ambiente pela PUC-Rio. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ). Doutor em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Bioquímica da Escola de Química da UFRJ.

Afonso Aurélio de Carvalho Peres⁽³⁾

Doutor em Ciência Animal e Mestre em Produção Animal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ. Especialista em Gestão e Estratégias no Agronegócio e graduado em Zootecnia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ. Professor Associado II e Pesquisador da Universidade Federal Fluminense. Professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade Federal Fluminense. Professor do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Chefe do Departamento de Engenharia de Agronegócios da UFF. Vice-diretor da Escola de Engenharia de Volta Redonda.

Caio de Teves Inácio⁽⁴⁾

Pesquisador da Embrapa Agrobiologia. Eng. Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo/Agronomia. Docente externo do Programa de Eng. Ambiental da UFRJ e do Programa de Eng. Agrícola e Ambiental da UFRRJ.

Endereço⁽¹⁾: Av. Brigadeiro Luis Antônio, 499 – Bela Vista – São Paulo - SP - CEP: 01318-000 - Brasil - Tel: (27) 99813-9515 - e-mail: indiara@poli.ufrj.br

RESUMO

Uma das técnicas mais eficazes para tratar esgotos no Brasil ocorre através da tecnologia de lodos ativados, que garante uma remoção de carga orgânica superior a 90%. Porém há a geração de um resíduo conhecido, como lodo de esgotos, na ordem de 0,227 kg de lodo por metro cúbico de esgoto tratado. Assim, o processamento e a destinação adequada de lodo são um dos grandes desafios das empresas de saneamento, chegando a atingir, cerca de 60% dos custos operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgoto. Logo, faz-se necessário buscar soluções sustentáveis para destinação desse resíduo. Nesse cenário, a compostagem pode representar uma saída técnica e economicamente viável para fechar o ciclo do saneamento. O composto produzido pode ser uma fonte de receita acessória ao setor de saneamento e uma fonte de economia e desenvolvimento para a agricultura urbana e periurbana. Este trabalho testou a aplicação de técnicas de compostagem para tratamento do lodo de esgoto, e verificou que é possível promover a desinfecção do lodo através desse processo, além produzir um fertilizante que atende as exigências de qualidade da legislação vigente, por meio de um investimento economicamente viável para as companhias de saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento, Lodo de Esgoto, Resíduo Orgânico, Fertilizante Orgânico, Reciclagem.

INTRODUÇÃO

Atualmente uma das técnicas mais eficazes para tratar efluentes domésticos é o sistema de “lodos ativados” (MELCHIOR et al., 2003). Segundo Von Sperling (1997) esse método chega a garantir eficiência superior a 90% na remoção de matéria orgânica, e produz um efluente tratado, que pode ser lançado em corpos hídricos sem prejuízo ao ecossistema. Porém, há a geração de um resíduo, o lodo de esgoto, na ordem de 0,227 kg/m³ de lodo por esgoto tratado (ABREU, 2017).

Para transportar o lodo de esgoto é necessário reduzir, consideravelmente, o teor de umidade do material, e em seguida geralmente, destiná-lo em aterros sanitários. Assim, o processamento e a destinação do lodo são um grande desafio das empresas de saneamento, chegando a consumir, cerca de 60% dos custos operacionais de uma ETE (ANDREOLI et al, 2001).

A fim de reduzir os custos com tratamento, transporte e disposição de lodos é necessário buscar alternativas sustentáveis para fechar o ciclo do processo de tratamento de esgotos. O lodo de ETE é um material rico em nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, e quando bioestabilizado, adequadamente, se torna um fertilizante. A Resolução CONAMA n° 498, estabeleceu critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos brasileiros (BRASIL, 2020). Se atendidos os critérios estabelecidos nessa resolução, o biossólido pode ser reutilizado como adubo, desde que seja reduzida a quantidade de patógenos e a atratividade de vetores. Para isso, técnicas, como calefação, caleação, e compostagem, podem ser utilizadas para remoção desses vetores, possibilitando o uso futuro do material tratado, para diversos fins (ZHOU et al., 2015).

O processo de compostagem deve ser analisado economicamente pelas companhias de saneamento, avaliando os custos envolvidos com a sua implantação e todos os seus custos operacionais, e comparando-os com os custos desprendidos, com a destinação do lodo em aterros sanitários, pois além de promover a desinfecção do lodo, a compostagem também pode representar a geração de um novo produto, que é o adubo orgânico, possibilitando a sustentabilidade do processo. Sendo assim, a análise de custo da produção e a viabilidade econômico-financeira são ferramentas imprescindíveis para a tomada de decisão do empreendedor, com relação ao aproveitamento do lodo para produção de fertilizantes (GASPAR et al, 2020).

OBJETIVOS

Este trabalho buscou avaliar a aplicação de técnicas de compostagem para transformação do lodo de esgoto em adubo orgânico, avaliando a qualidade do composto gerado, bem como, a viabilidade econômico-financeira.

METODOLOGIA

Este estudo foi dividido em 4 etapas principais, primeiramente (i) foi realizada uma pesquisa bibliográfica para conhecer os diferentes métodos de tratamento e disposição de lodo no Brasil, e no mundo, a fim de identificar qual a melhor solução para esse caso específico; em seguida (ii) foram realizados ensaios de laboratório para identificar, se o lodo gerado na ETE estudada, e o resíduo de poda da cidade apresentam características físicas, químicas e microbiológicas apropriadas para o processo de compostagem, e definir qual a melhor proporção para a formação do composto; posteriormente (iii) foi realizado teste piloto para verificar o resultado dos testes de laboratório; e por fim (iv) o estudo de viabilidade econômico-financeira dessa forma de destinação do lodo, frente a outras possibilidades praticadas pela concessionária, a fim de garantir que essa alternativa é de fato economicamente viável e indicada para redução de custos da empresa.

As quatro etapas de trabalho serão descritas a seguir:

PRIMEIRA ETAPA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tratamento e a disposição de lodo devem ser realizados com o objetivo de minimizar problemas ambientais, como odor e lançamento no ambiente de contaminantes e patógenos (HALLEY & MILLER, 1991). A destinação final do lodo de esgoto inclui principalmente aplicação em terras cultiváveis, aterro sanitário, incineração, compostagem e, até o uso secundário em materiais de construção (RAHEEM ET AL., 2018).

- Disposição de lodo em terras cultiváveis

O lodo de esgoto doméstico, após ter sido higienizado com a adição de cal, pode ter aproveitamento agrícola efetuado como corretivo de acidez e de fertilidade (MATOS & MATOS, 2012). Além disso, o lodo contém concentrações significativas de nitrogênio e fósforo, que o confere potencial para o uso agrícola, como fertilizante natural. No entanto, também se incluem diferentes poluentes, inorgânicos, orgânicos, como metais tóxicos, microplásticos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e patógenos (SIEBIELSKA, 2014). Portanto, o espalhamento de lodo por muito tempo no solo pode levar ao acúmulo de contaminantes e afetar os

ecossistemas. Logo sua administração, quando viável, deve ser feita com cuidado e atenção ao que preconiza as legislações vigentes.

No Estado de São Paulo, a taxa de aplicação de lodo de esgoto segue a norma técnica P4.230 da CETESB (1999), e leva em consideração o aporte de metais tóxicos, aporte de Nitrogênio em relação à demanda nutricional da planta e, a reação do solo.

Có Júnior et al. (2008) avaliou os efeitos de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto na qualidade de amostras de cana-de-açúcar e comparou com amostra testemunha, cuja fertilização foi feita através de fertilizante mineral, e constatou que, não houve diferença na qualidade das amostras. Os valores de pureza do caldo foram muito próximos entre 93,96 e 94,45%, destacando um expressivo potencial para o uso do biossólido para essa finalidade.

Chiba et al. (2008) testou o cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto e, concluiu que a aplicação do resíduo causou danos à qualidade do solo, em termos de metais tóxicos, mesmo com reaplicação em anos sucessivos. Foi constatado que houve aumento nos teores de zinco (Zn) e cobre (Cu) disponíveis no solo, porém, abaixo dos limites aceitáveis pela legislação ambiental. Considerando que a disponibilidade do Zn no solo também é aumentada em valores de pH abaixo de 5,0–5,5 (ABREU et al., 2001) e que a correção de pH do solo pode não ser realizada rotineiramente, o monitoramento desses metais no solo e na planta se faz necessário, para evitar possíveis problemas ambientais decorrentes da aplicação do lodo.

Sendo assim, a aplicação de lodo de esgoto como fonte de nutrientes pode ser uma alternativa para a destinação desse resíduo, já que nos estudos avaliados nesta revisão, não ocasionou riscos ao meio ambiente, porém, há a necessidade de implementar ações de monitoramento das áreas tratadas com lodo por longos períodos (CHIBA ET AL. 2008). Complementarmente, Fernandes & Silva (1999) alertam que, devido ao fato de o lodo também conter microrganismos patogênicos, sua disposição no solo sem qualquer tratamento, pode colocar em risco a saúde pública. O tratamento e a disposição de lodo devem ser realizados com o objetivo de minimizar problemas ambientais como, odor e o lançamento no ambiente de contaminantes e patógenos (HALLEY & MILLER, 1991). A destinação final do lodo de esgoto inclui principalmente aplicação em terras cultiváveis, aterro sanitário e uso secundário em materiais de construção (RAHEEM ET AL., 2018).

- **Disposição de lodo em aterro sanitário**

Embora muitos países já utilizem amplamente o lodo como fertilizante, devido às razões técnicas e econômicas, os aterros sanitários ainda são a principal forma de destinação desse resíduo atualmente (XU ET AL., 2014; ZHANG ET AL., 2018). Entretanto, aterros sanitários demandam grandes áreas e em grandes centros urbanos, e isso pode representar um empecilho relevante, a longo prazo.

W. Han et al. (2021) analisou diferentes formas de disposição de lodo de esgoto sob vários aspectos. Ele observou que do ponto de vista de impacto ambiental, o método de disposição em aterro sanitário foi o que apresentou os piores índices de aumento do potencial de acidificação do solo, sendo o maior entre todos os métodos analisados, o segundo pior em termos de emissão de gases do efeito estufa (GEE), e o terceiro em potencial de eutrofização.

A deposição de lodos em aterros sanitários é uma destinação segura, mas o alto custo da manutenção, que nem sempre é realizada adequadamente, pode não resolver os problemas de contaminação do solo, ar e água (QUINTANA et al., 2011). Em países desenvolvidos, os aterros sanitários já não são mais a principal alternativa para dispor lodo. Nos Estados Unidos, por exemplo, a disposição em aterros sanitários representa apenas 17% do total de lodo destinado (SPINOSA, 2011).

- **Incineração de lodo**

Incinerar o lodo de esgoto tem sido uma opção crescente em países da Europa (RAHEEM ET AL., 2018). Além de demandar áreas bem menores, em comparação com os aterros sanitários, o processo de incineração de lodo, possibilita a recuperação energética. Ao mesmo tempo, ela pode reduzir o volume de lodo em 90% e quase todos os patógenos. As cinzas residuais da incineração de lodo podem ser descartadas em aterros ou podem ser usados na confecção de materiais de construção (XINYU et al., 2020).

O lodo para ser incinerado, passa por uma etapa de desidratação prévia para reduzir a umidade para 60%, antes do processo de início da queima, e então, o lodo pode ser incinerado sem entrada externa de energia (ABUSOGLU et al., 2017). Quanto menor for o teor de umidade, maior será o poder calorífico e, conseqüentemente, maior a energia que pode ser gerada pelo lodo (W. LIU, C.M. IORDAN, F. CHERUBINI et al, 2021). Além disso, para garantir a estabilidade da geração de energia de combustão, carvão é geralmente adicionado à geração de energia de co-combustão.

Um dos pontos negativos da incineração é que ela produz muita emissão de gases do efeito estufa, principalmente gases de combustão (W. LIU, C.M. IORDAN, F. CHERUBINI et al, 2021). Atualmente, com o excesso de emissão de gases de combustão gerado em diversos seguimentos da indústria, e o crescente impacto que isso tem causado na camada de ozônio, essa alternativa pode se tornar menos indicada para o gerenciamento do lodo de esgoto. Todavia, em território nacional, os fornos devem obedecer aos padrões de emissão gasosa, conforme a Resolução CONAMA n° 316 de 2002 e 499 de 2020.

- **Compostagem de lodo**

Inácio e Miller (2009) definiram a compostagem como uma técnica de tratamento de resíduos orgânicos constituída de práticas que promovem a decomposição biológica em temperaturas termofílicas (entre 55°C e 75°C).

Após a realização da compostagem a matéria orgânica, o nitrogênio e o fósforo presentes no lodo podem ser utilizados como fertilizante orgânico, possibilitando uma melhora da qualidade do solo (ZHEN et al., 2017). Considerando que, o lodo contém patógenos, a sua aplicação deve atender as legislações vigentes, a fim de evitar risco à saúde pública. A compostagem representa uma alternativa para viabilizar o reuso agrícola do lodo de esgoto, pois através dela, é possível eliminar ou diminuir essa concentração de patógenos, pela ação de microrganismos, fazendo com que o composto formado atinja os níveis exigidos pela legislação (RIBEIRO, 2018).

Apesar de requerer alguns cuidados como condições ideais (temperatura, pH, oxigênio, microrganismos, umidade, relação C/N e granulometria) para evitar a geração de odores, proliferação de vetores e doenças (KIEHL, 2004, INÁCIO; MILLER, 2009) a compostagem é uma técnica relativamente simples, segura e barata, e além de ser uma alternativa para desinfecção do lodo, pode representar uma fonte de receita acessória aos operadores de saneamento, de acordo com Gaspar (2020) a viabilidade econômica da compostagem está ligada à obtenção e à comercialização de fertilizante orgânico obtido dos resíduos sólidos orgânicos produzidos que seriam descartados. Caso o adubo produzido a partir do lodo tenha a qualidade requerida pelos produtos agrícolas, e haja um trabalho de conscientização dos possíveis clientes com relação às vantagens desse produto ele pode se tornar um novo produto para o setor de saneamento.

SEGUNDA ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Para estabelecer os critérios a serem adotados no processo de compostagem do lodo da ETE avaliada, foram realizadas algumas análises laboratoriais e estudos conforme segue: i) Caracterização do lodo de esgoto quanto aos parâmetros: série de sólidos; teores de C-total, N-total, relação C/N, valores de pH, condutividade elétrica, contaminantes: As, Cd, Pb, Cr, Hg, Ni, Se, Ba, Cu, Mo, Zn e patógenos (coliformes totais e *E. coli*, e *Salmonella sp*); ii) Caracterização dos materiais estruturantes: poda de árvore e aparas de gramas: teor de umidade; teores de C-total, N-total, relação C/N; iii) Ensaio de respirometria visando obtenção de percentual de material estruturante e de lodo de esgoto adequados para processo de decomposição, de modo a obter o maior volume de lodo compostado e menor volume possível de material estruturante necessário para o processo (CETESB, 1990).

As amostras de lodo de esgoto foram homogeneizadas e quarteadas até atingir uma massa de 200g. Nos materiais in natura foram determinados os valores de pH, em solução de CaCl₂, e condutividade elétrica em água.

A série de sólidos foi determinada de acordo com Andrade & Abreu (2006). O material seco em uma temperatura de 65°C foi moído e determinou-se os teores de C-total e N-total. As amostras foram conservadas na temperatura de 4°C e então, foi realizada a quantificação de coliformes totais, fecais, *Salmonella sp*, pela metodologia da USEPA (2003).

Os materiais estruturantes foram coletados em dois momentos diferentes e caracterizados quanto aos teores de água, C-total e N-total.

Para determinar a melhor proporção entre o lodo e a poda, considerando que, a relação C/N ideal, se situa entre 20 e 30 (Andreoli et al., 1999), foi conduzido um ensaio de respirometria, de acordo com a Norma CETESB L6.350 (CETESB, 1990) modificada, que consiste na captura de CO₂ liberado pelos microrganismos decompositores, por uma solução alcalina de NaOH de concentração conhecida, cuja condutividade foi medida diariamente, de acordo com Rodella e Saboya (1999). O teste foi conduzido por um período de 90 dias, até a estabilidade das leituras de condutividade elétrica, com 7 tratamentos, conforme é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Tratamentos utilizados no ensaio de respirometria com a mistura de materiais lodo de esgoto e poda de árvore triturada.

Tratamentos	Relação C/N mistura	% na mistura
Lodo + açúcar - Controle	30:1	33,0% poda + 67,0% açúcar
Lodo + poda de árvore	30:1	88,5% poda + 11,5% lodo
Lodo + poda de árvore	27:1	82,1% poda + 17,9 % lodo
Lodo + poda de árvore	25:1	77,3% poda + 22,7% lodo
Lodo + poda de árvore	24:1	75,0% poda + 25,0% lodo
Lodo + poda de árvore	20:1	63,0 % poda + 37,0% lodo
Lodo + poda de árvore	16,5:1	50,0% poda + 50% lodo

Os resultados de C-CO₂ liberado foram ajustados em razão do tempo de incubação, usando equação de cinética química de primeira ordem (LATHAM, 1974) a fim de estimar os parâmetros indicativos da quantidade de carbono potencialmente degradada e a velocidade de degradação das misturas (equação 1). Os resultados ajustados foram submetidos à análise estatística pelo teste de Tukey a 5%, utilizando o programa de análise estatística R (versão 2.15.1).

$$C\text{-degradado} = C_0 \times (1 - e^{-kt}) \quad \text{equação (1)}$$

Em que:

C-degradado: a quantidade de C em mg liberada na forma de CO₂ no tempo de realização do ensaio;

C₀: a quantidade de C em mg potencialmente degradável e liberado na forma de CO₂, durante o teste;

k: a constante de velocidade de degradação do carbono orgânico em dia⁻¹;

t: o tempo em dias.

A partir da estimativa dos parâmetros acima descritos, foi possível calcular o tempo de meia vida (T_{1/2}), que seria o tempo, em dias, necessário para que 50% do valor estimado para C₀ fossem liberados, através do processo de degradação do material orgânico de cada tratamento.

TERCEIRA ETAPA: ENSAIO PILOTO DE COMPOSTAGEM

O projeto piloto de compostagem do lodo foi dividido nas seguintes etapas:

Primeiramente foi realizada a montagem e condução das pilhas de compostagem, com monitoramento diário de temperaturas das pilhas, revolvimento, irrigação e coleta de amostras para avaliação do processo de compostagem. Foram montadas 02 pilhas de compostagem com cerca de 10 toneladas de lodo em cada. A pilha 1, no dia 14 de junho de 2022, com massa de 6,6 toneladas de poda e 4,6 toneladas de lodo, dimensões de 1,2m de altura, 3,0m de comprimento, e relação C/N 27:1. A pilha 2, no dia 08 de julho de 2022, com 5,6 toneladas de poda e 10,5 toneladas de lodo, 1,5m de altura, 4,5m de comprimento e relação C/N 17:1 (Figura 1);



Figura 1: Montagem das Pilhas.

Em seguida, foi feita a coleta de amostras a cada 15 dias, durante os primeiros 60 dias do processo, com realização das análises: série de sólidos; teores de C-total; N-total; relação C/N; valores de pH, condutividade elétrica, teores de C, N, ovos de helmintos, coliformes totais e *E. coli*, *Salmonella sp.*;

Por fim, foi realizada a coleta final das amostras após a fase de maturação para obtenção dos resultados.

QUARTA ETAPA: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA COMPOSTAGEM DE LODO

Nesta etapa foi realizado o levantamento de informações para elaboração de custos e análise da viabilidade econômica do processo de compostagem: equipamentos, recursos humanos e insumos necessários e o comparativo com as formas de destinação atualmente utilizadas pela companhia, a fim de verificar se a compostagem, além de ser uma alternativa sustentável se mostra viável economicamente.

Foram analisados 2 cenários, o primeiro comparando os custos operacionais e de investimentos necessários para a realização da compostagem com a disposição em Aterro Sanitário, o segundo comparando os mesmos custos com a disposição em um Centro de Compostagem terceirizado. Na caracterização dos cenários, foram considerados a geração mensal de 100 toneladas de lodos provenientes da Estação de Tratamento de Esgotos avaliada, a utilização da área da própria ETE para realização do processo de compostagem, e os custos com análises laboratoriais foram orçados com laboratório terceirizado. Não foi considerado aumento de quadro de colaboradores para realização do processo de compostagem, esse foi conduzido pelos próprios operadores da ETE, foi considerada apenas a inclusão de um operador de retroescavadeira dedicado, e a locação de uma nova retroescavadeira, praticando os mesmos preços já ofertados pelo fornecedor contratado da Concessionária, já incluso o combustível. Para ambos os cenários, foi considerado um horizonte temporal de 20 anos de exploração da atividade, tendo em vista o prazo remanescente do Contrato de Concessão da ETE. Os custos foram corrigidos anualmente pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA, produzido contínua e sistematicamente pelo Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor – SNIPC com o objetivo de medir a inflação de um conjunto de produtos e serviços comercializados no varejo (IBGE, 2021).

Foi realizada a análise de investimentos, neste caso a metodologia proposta é a recomendada por Blank e Tarquin (2008) e os preços foram cotados junto aos fornecedores no ano de 2021. Foram considerados custos com: sondagem do terreno, contratação de consultoria especializada para conduzir a implantação, análises laboratoriais preliminares para determinação das características físico-químicas e microbiológicas dos componentes e especificação da mistura que originaria o composto, obtenção de licença de operação junto ao órgão competente, e aquisição de equipamentos e materiais necessário. A partir das informações coletadas, da caracterização e da quantificação da unidade de compostagem instalada na ETE, foram construídas as planilhas eletrônicas, utilizando a ferramenta Microsoft-Excel®.

O fluxo de caixa foi montado a partir dos custos levantados para investimento ou *Capex*, sigla da expressão inglesa *Capital Expenditure*, que pode ser definida como Despesas de Capital ou Investimentos em Bens de Capitais, e custos de operação ou *Opex*, sigla do termo em inglês *Operational Expenditure*, que estão relacionados com os gastos das atividades rotineira, como despesas tributárias, despesas com funcionários, contas, manutenção de equipamentos e outros da unidade de compostagem durante 20 anos.

De posse do fluxo de caixa foi possível realizar a análise da viabilidade econômico-financeira e a determinação dos indicadores econômicos de rentabilidade, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), conforme metodologia descrita por Blank e Tarquin (2008). Também foi possível identificar o tempo de recuperação do capital investido por meio da análise do *payback* descontado, proposto por Assaf Neto (1992).

A expressão utilizada para cálculo do VPL foi à seguinte:

$$VPL = \sum_{n=1}^n VF / ((1 + r)^t) \quad \text{equação (2)}$$

Em que:

VPL = valor presente líquido;

VF = valor do fluxo líquido (diferença entre entradas e saídas);

N = números de fluxos;

r = taxa de desconto;

t = período de análise (i = 1, 2, 3...)

Como a TIR é a taxa de desconto que iguala o VPL a zero, a mesma pode ser determinada utilizando a seguinte expressão: As metodologias adotadas na presente dissertação constaram das seguintes etapas:

$$VPL = VF_0 + \frac{VF_1}{(1+r)^1} + \frac{VF_2}{(1+r)^2} + \frac{VF_3}{(1+r)^3} + \dots + \frac{VF_n}{(1+r)^n} \quad \text{equação (3)}$$

Em que:

F = fluxo de caixa líquido (0, 1, 2, 3, ..., n);

r = taxa de desconto.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

Entre as formas de destinação de lodo estudadas, optou-se pela compostagem, devido ao baixo custo para execução do projeto piloto. Nela, os riscos são mais simples de serem identificados e controlados, além da possibilidade de aplicação do fertilizante produzido, no setor agrícola, o que é totalmente aderente à realidade do município onde a Estação de Tratamento de Esgotos escolhida para realização deste trabalho está localizada.

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Os valores de pH de lodo obtidos estão próximos ao neutro, compatíveis aos lodos gerados em processos de tratamento aeróbios. Já os resultados de condutividade, foram 50% menores aos lodos gerados com esse tipo de tratamento (Tabela 2). A relação entre os teores de sólidos voláteis (SV) e de sólidos totais (ST) foi elevada sendo favorável para aplicação direta em solo, porém as concentrações de coliformes totais (CT) e de *E. coli* indicaram a necessidade de um processo adicional de desinfecção.

Tabela 2: Caracterização físico-química, química e microbiológica do lodo de esgoto.

Coleta data	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	CE (μS cm ⁻¹)	Teor H ₂ O (65°C)	Sólidos totais (%)	Sólidos voláteis (MO) (%)	Sólidos fixos (Cinzas) (%)	C (%)	N (%)	C/N	Coliformes totais (NMP.g ST ⁻¹)	E. Coli (NMP.g ST ⁻¹)	Salmonella sp
03/08/2021	6,6	6,2	390,5	86,8	12,3	8,9	3,4	36,0	5,6	6,7	>1,3 x 10 ⁶	1,3 x 10 ⁶	Negativo
18/11/2021	6,9	6,4	528,5	76,4	12,2	9,3	2,9	34,4	4,6	7,5	-	-	-

De acordo com os resultados de metais tóxicos obtidos na análise das amostras de lodo e reportados na Tabela 3, o lodo avaliado atende os limites estabelecidos pelas Resoluções Cetesb P4.320, e Conama n° 498, pela qual pode ser classificado como Classe 1, por apresentar resultados bem abaixo dos valores máximos permitidos por essa Resolução.

Tabela 3: Caracterização do lodo de esgoto quanto a presença de metais.

Parâmetro	Cetesb P.4230	Conama 498		Resultado
		Classe I	Classe II	
(mg.kg ⁻¹)				
Arsênio	75	41	75	2,26
Cádmio	85	39	85	0,438
Cobre	4300	1500	4300	110
Chumbo	840	300	840	12,3
Mercúrio	57	17	57	0,472
Molibdênio	75	50	75	3,35
Níquel	420	420	420	18,4
Selênio	100	36	100	< 1
Zinco	7500	2800	7500	436

As podas de árvores apresentaram o teor de umidade em torno de 46%, a grama fresca de 40%, e a grama seca cerca de 10% menos (Tabela 4). Esses dados devem ser considerados no uso desses materiais estruturantes, durante o processo de compostagem, a fim de equilibrar a umidade necessária para a mistura, que é entre 55 e 65% (ANDREOLI et al., 1999).

Na Tabela 4 é apresentada uma elevada relação entre o carbono e o nitrogênio (C/N) dos materiais estruturantes analisados, demonstrando que esses podem ser misturados ao lodo de esgoto, a fim de atingir a relação C/N recomendada.

Tabela 4: Caracterização dos materiais estruturantes

Amostra e data	Teor de H ₂ O (65°C)			
	C*	N*	C/N	
Poda 18/11/2022	47,1	21,4	0,7	30,6
Poda 03/03/2022	46,5	70,8	0,8	88,5
Grama Verde 03/03/2022	43,4	70,6	0,6	117,6
Grama Seca 03/03/2022	31,2	66,5	0,9	73,8

*Material seco (65°C)

A decomposição da matéria orgânica e a liberação de CO₂ foi maior para o tratamento contendo a relação C/N de 25:1, seguido do tratamento 24:1 e 27:1 (Tabela 5). Contudo, a variação da liberação de CO₂ foi menor que 1% entre os tratamentos com poda de árvore, embora o volume de material estruturante utilizado tenha variado até quase 40%, indicando uma possibilidade de redução do volume de estruturante, sem afetar o resultado do processo de decomposição.

Tabela 5: Parâmetros da equação de cinética de primeira ordem estimados a partir do ajuste dos dados de C-evoluído e taxa de degradação, obtidos ao longo de 90 dias de condução do teste de respirometria (1)

Amostra	C - adicionado	C-CO ₂ evoluído	C- degradado	CO	K (dia ⁻¹)	R ²	t _{1/2} (dias)	C- degradado (%)	Equação
Lodo/Açúcar	44.984	22.976,4	6.265,6	59.950,1	0,0198	0,9931	35,2	13,9	C-CO ₂ evoluído = 59950,1x (1 - e ^{-0,0198t})
C/N 30:1	27.209	25.013,3	6.821,1	62.436,4	0,0201	0,8593	34,5	25,0	C-CO ₂ evoluído = 62436,4 x (1 - e ^{-0,0201t})
C/N 27:1	26.810	25.054,2	6.832,2	62.460,9	0,0201	0,9968	34,4	25,4	C-CO ₂ evoluído = 62460,9 x (1 - e ^{-0,0201t})
C/N 25:1	26.426	25.178,8	6.866,2	63.173,7	0,0198	0,9965	34,9	25,9	C-CO ₂ evoluído = 63173,7 x (1 - e ^{-0,0198t})
C/N 24:1	26.347	24.657,8	6.724,1	60.401,8	0,0209	0,9971	33,1	25,5	C-CO ₂ evoluído = 60401,8 x (1 - e ^{-0,0209t})
C/N 20:1	25.274	23.342,7	6.365,5	54.219,6	0,0236	0,9977	29,3	25,1	C-CO ₂ evoluído = 54219,6 x (1 - e ^{-0,0236t})
C/N 16:1	24.250	22.567,3	6.154,1	51.421,5	0,0249	0,9981	27,7	25,3	C-CO ₂ evoluído = 51421,5 x (1 - e ^{-0,0249t})

(1) Médias seguidas pelas mesmas letras na vertical não diferem entre si – Tukey 5%
 C-CO₂ evoluído = C₀ x (1 - e^{-kt}) C-CO₂ evoluído = quantidade de CO₂ (mg) liberado no tempo de realização do teste de degradação
 C₀ = quantidade de CO₂ potencialmente liberado (mg), no tempo de realização do teste de degradação
 k = constante de velocidade de degradação do carbono orgânico (dia⁻¹)
 t = tempo em dias

RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

Mensalmente foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas para o monitoramento do processo (Tabelas de 6 a 9).

Tabela 6: Caracterização das amostras componentes da mistura da pilha.

Amostra	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Ovos viáveis helmintos Ovos/g ST	Salmonella	Coliformes NMP/g ST	
					Totais	Voláteis	Fixos						Totais	<i>E. coli</i>
Lodo de esgoto	7,3	6,8	790,0	87,8	11,4	6,0	5,4	18,3	2,8	6,4	0,23	ausente	8,1 x 10 ⁶	2,9 x 10 ⁴
Poda de árvore	-	-	-	35,0	-	-	-	31,8	0,6	50,4	-	-	-	-

Tabela 7: Monitoramento da Pilha 1 montada dia 14/06/2022 – 6,6 ton de lodo + 4,6 ton de poda Relação C:N = 27:1.

Amostra	pH		CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Ovos viáveis helmintos Ovos/g ST	Coliformes	
	H ₂ O	CaCl ₂			Totais	Voláteis	Fixos					Totais	<i>E. coli</i>
20/06	7,3	6,5	1.161,5	50,0	47,7	35,9	11,9	27,6	1,8	15,8	negativo	3,4 x 10 ⁵	2,3 x 10 ³
14/07	7,5	6,8	1.253,5	39,6	59,6	40,3	19,3	9,8	1,6	5,9	negativo	1,1 x 10 ⁵	7,6 x 10 ²
05/08 pen	7,4	6,9	1.308,5	39,2	57,4	27,9	29,4	21,2	1,1	19,3	negativo	-	-
05/08/spen	7,3	6,9	1.200,00	42,4	48,3	31,2	17,1	20,2	1,5	13,1	negativo	3,8 x 10 ⁴	1,7 x 10 ³
13/09 spen	8,1	7,1	918,0	7,1	53,0	26,5	26,5	15,8	0,9	18,4	negativo	3,2 x 10 ³	3,2 x 10 ³
13/10 (120d)	8,0	7,1	792,5	48,9	49,3	23,9	25,4	14,5	1,2	12,1	negativo	2,6 x 10 ³	<3,0x10 ²

Tabela 8: Caracterização das amostras componentes da mistura da pilha 2.

Amostra	pH		CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Ovos viáveis helmintos Ovos/g ST	Salmonella	Coliformes NMP/g ST	
	H ₂ O	CaCl ₂			Totais	Voláteis	Fixos						Totais	<i>E. coli</i>
Lodo de esgoto	7,7	7,1	932,5	81,2	17,6	9,9	7,7	17,4	3,2	5,5	0,58	ausente	5,2 x 10 ⁵	3,1 x 10 ⁵
Poda de árvore	-	-	-	35,1	-	-	-	31,2	0,7	44,6	-	-	-	-

Tabela 9: Monitoramento da Pilha 2 montada dia 08/07/2022 – 10 ton de lodo + 5,6 ton de poda relação C:N = 17:1.

Amostra	pH		CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Ovos viáveis helmintos Ovos/g ST	Coliformes	
	H ₂ O	CaCl ₂			Totais	Voláteis	Fixos					Totais	<i>E. coli</i>
20/07	7,5	6,8	1.338,0	25,7	57,8	46,0	11,8	25,2	1,7	15,8	-	-	-
05/08pn	7,5	6,9	1.468,0	38,1	61,0	31,3	29,8	13,9	1,4	5,9	-	-	-
05/08sp	7,3	6,8	1.422,5	37,0	59,4	36,0	23,4	25,8	1,4	19,3	Negativo	3,8 x 10 ⁵	1,5 x 10 ⁴
13/09	7,7	7,1	1.318,0	38,2	54,8	26,9	27,8	23,1	1,0	23,1	Negativo	3,3 x 10 ²	3,3 x 10 ²
13/10 (90d)	7,7	7,1	939,0	57,3	41,7	22,1	19,6	20,5	1,6	12,9	Negativo	2,2 x 10 ³	<4,3x10 ²

Após 120 dias, a pilha 1 apresentou uma redução superior a 99% na concentração de coliformes totais e 87% de *E. Coli* (Tabela 7), indicando que o processo de compostagem foi eficaz para reduzir a concentração dos patógenos do composto, conforme previsto na legislação vigente. Os demais parâmetros analisados, como

umidade, pH e relação C/N, atenderam as especificações da IN25, do Ministério da Agricultura e Pecuária MAPA, para considerar o material como fertilizante orgânico de Classe D (BRASIL, 2009).

A pilha 2 (Tabela 9), após o período de 90 dias, apresentou todos os resultados dentro dos limites aceitáveis pela legislação, para a classe citada.

A temperatura foi monitorada diariamente ao longo de todo o período de teste.



Figura 2: Monitoramento da Temperatura de Pilha 1.



Figura 3: Monitoramento da Temperatura de Pilha 2.

Com relação a temperatura, foi constatado vários pontos de temperatura abaixo da ideal (55°C), indicando que houve falhas no processo de revolvimento e irrigação (Figuras 2 e 3). É imprescindível um controle rigoroso da temperatura e o revolvimento adequado, a fim de manter a temperatura acima de 55°C, para garantir a eficácia da remoção de patógenos.

RESULTADOS DA QUARTA ETAPA

O cenário I considerou a disposição dos resíduos em um aterro sanitário localizado na cidade de Guarulhos, localizado no estado de São Paulo, a 50,3 km da ETE avaliada neste trabalho. Dessa forma, a distância a ser percorrida são 100,6 km para um percurso de ida e volta. Em 2021, esse aterro praticava a cobrança de R\$ 115,00 por tonelada de lodo recebida, e o custo com transporte, praticado por empresa terceirizada, era de R\$ 183,20 por tonelada.

Para obtenção da licença de transporte e destinação do bio-sólido (CADRI), além do pagamento da taxa de R\$ 2.400,00, é necessário realizar análises laboratoriais, como teor de sólidos de cada carga, e caracterização do

conteúdo a ser descartado, conforme NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004). A renovação do CADRI ocorre a cada 5 anos. Ao todo, os custos anuais com análises laboratoriais totalizam R\$ 7.000,00, sendo parte realizada em laboratório interno da ETE e outra parte subcontratada. Como esses custos já são usualmente praticados pela operação, não foi necessário realizar nenhum tipo de investimento. Considerando que, os serviços de transporte são terceirizados, também não foi considerado os custos com depreciação. A mão-de-obra responsável já faz parte do quadro de colaboradores da ETE, logo não foi considerado custos extras com nova contratação. Os custos totalizaram R\$ 10.073.741,00 por um período de 20 anos (Tabela 10).

Tabela 1 Custo total com destinação em Aterro Sanitário, durante um período de 20 anos (Cenário I).

Itens avaliados	Valor (20 anos)
(-) Custo Operacional	R\$ 10.073.740,00
Transporte Aterro Sanitário	R\$ 6.062.614,00
Disposição Aterro Sanitário	R\$ 3.805.680,00
Análises Laboratoriais (insumos)	R\$ 49.639,00
Análises Laboratoriais (serviços terceirizados)	R\$ 143.402,00
CADRI	R\$ 12.405,00

Valores de 2021 corrigidos anualmente pelo IPCA.

Já para o cenário II, foi considerado que a disposição dos bio sólidos em um Centro de Compostagem privado, localizado em Jundiá, a 64,7 km da ETE. O percurso de ida e volta são 129,4 km. Este Centro de Compostagem praticava o valor de R\$ 110,00/tonelada, pela disposição do resíduo, já os custos de transporte neste cenário são um pouco mais elevados devido à distância, totalizando R\$ 200,00 por tonelada transportada. Os demais custos foram mantidos, pois são equivalentes nos dois cenários (Tabela 11).

Tabela 2 Custo total com destinação em Centro de Compostagem, durante um período de 20 anos (Cenário II).

Itens avaliados	Valor (20 anos)
(-) Custo Operacional	R\$ 10.464.236,00
Transporte Centro de Compostagem	R\$ 6.618.574,00
Disposição Centro de Compostagem	R\$ 3.640.216,00
Análises Laboratoriais (insumos)	R\$ 49.639,00
Análises Laboratoriais (serviços terceirizados)	R\$ 143.402,00
CADRI	R\$ 12.405,00

Valores de 2021 corrigidos anualmente pelo IPCA.

As análises dos diferentes cenários para determinação do custo operacional total (*Opex*), da destinação e disposição final dos bio sólidos, para um período de vinte anos, mostraram-se elevados, e promovem um grande impacto financeiro na atividade. Uma atividade é viável quando a redução de custos, supera os investimentos despendidos e o grande desafio das companhias é a capacidade de promover a redução dos custos operacionais em seu sistema produtivo (GASPAR, 2020).

Considerando que os resíduos sólidos orgânicos podem ser matéria prima para produção de fertilizantes orgânicos, condicionadores de solo e produção de biogás (BRASIL, 2009), a adoção de tecnologias e técnicas com essa finalidade pode permitir uma redução nos custos totais de gerenciamento de bio sólidos. Portanto, nos dois cenários apresentados foram introduzidos o investimento inicial necessário para produção de fertilizante, através do processo de compostagem, realizado na própria ETE, por meio de seus operadores, e a contratação de alguns serviços terceirizados que viabilizem esse novo processo operacional.

O investimento inicial (*Capex*) previsto para a implantação do processo de compostagem foi de R\$ 123.839,87 (Tabela 12). Esse custo considera a contratação de uma consultoria especializada para elaboração e condução do projeto, os custos com sondagem da parte do terreno da ETE, que será destinada à nova atividade, a contratação de um laboratório certificado para realização das análises laboratoriais, exigidas pela legislação vigente, os custos com licenciamento ambiental para inclusão do novo processo, e por fim os equipamentos e materiais necessários para execução da atividade.

Tabela 3 Capex do processo de compostagem.

Itens Avaliados	Valor total
(-) Investimentos	R\$ 123.839,87
Consultoria/Projeto	R\$ 50.124,70
Sondagens	R\$ 16.250,00
Análises lab. Externo	R\$ 45.000,00
Licenciamento ambiental	R\$ 4.830,00
Equipamentos	R\$ 2.893,82
Materiais	R\$ 4.741,35

Valores de 2021.

Além do *Capex* inicial, o processo de compostagem também tem os seus custos operacionais. Foi considerado todo *Opex* do projeto, para um período de 20 anos. Esses custos estão discriminados na Tabela 13, e preveem um incremento de mão-de-obra, no caso apenas de um operador de retroescavadeira, para realizar o revolvimento constante das pilhas de compostagem, uma vez que as demais atividades envolvidas no processo serão desempenhadas pelos próprios operadores da ETE.

Embora a irrigação das pilhas seja fundamental para o atingimento de bons resultados no processo de compostagem, os custos com água não foram considerados, pois pretende-se irrigar as pilhas com água de reuso obtida do efluente tratado na própria ETE.

Tabela 4 Opex da operação de compostagem durante 20 anos.

Itens avaliados	Valor (20 anos)
(-) Custo Operacional	R\$ 9.121.424,00
Mão-de-obra	R\$ 1.166.550,00
Consultoria/Serviços de monitoramento	R\$ 50.125,00
Análises Laboratoriais (Conama 498 e MAPA)	R\$ 1.240.983,00
Locação de retroescavadeira (combustível incluso)	R\$ 6.618.574,00
Licenciamento Ambiental	R\$ 35.943,00
Materiais e ferramentas	R\$ 9.249,00

Valores de 2021 corrigidos anualmente pelo IPCA.

Por fim, foi estabelecido um fluxo de caixa com os custos envolvidos na implantação e exploração da unidade de compostagem nos dois cenários, durante o período de vinte anos. Então, foi realizada a análise econômico-financeira e determinados o VPL e a TIR em cada caso. Em seguida identificou-se o tempo de recuperação do capital, por meio do *payback* descontado (Tabelas 14 e 15).

Tabela 5 Resultados econômico-financeiros Cenário I.

Investimento inicial	R\$ 123.839,87
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	12%
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 166.243,74
Taxa Interna de Retorno	25%
<i>Payback</i> descontado	6,39

Tabela 6 Resultados econômico-financeiros Cenário II.

Investimento inicial	R\$ 123.839,87
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	12%
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 296.513,31
Taxa Interna de Retorno	35%
<i>Payback</i> descontado	4,21

As análises econômico-financeiras se mostraram viáveis financeiramente nos dois cenários, quando o fluxo de caixa das propostas foi submetido à uma taxa de desconto de 12% a. a.. O resultado do cenário II foi mais atrativo, visto que apresentou VPL de R\$ 296.513,31 e TIR 35%, enquanto o cenário I apresentou VPL de R\$

166.243,74 e TIR e 25%. Tal fato se justifica, principalmente, em função dos custos com transporte no cenário I, que são inferiores aos do cenário II, o que torna o projeto um pouco menos atraente nesse cenário, já que o custo operacional total é mais baixo. Considerando uma TMA de 12%, taxa comumente utilizada pelas Companhias de Saneamento (SMIDERLE, 2016) e a mínima exigida pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) para projetos de saneamento (FONTENELE; VASCONCELOS, 2006), observou-se, nas Tabelas 14 e 15, que a avaliação econômico-financeira indicou uma rentabilidade para o projeto na ordem de 25% e 35% respectivamente, valor este superior a TMA escolhida, indicando financeiramente, que o projeto é atrativo.

O tempo de recuperação do capital investido foi determinado pelo *payback* descontado, cujo prazo foi de 6 anos para recuperação do investimento no cenário I, o que é considerado médio prazo, e de 4 anos para o cenário II, considerado curto prazo de recuperação dos investimentos (MARION, 2014).

CONCLUSÕES

Foi possível observar que a compostagem se mostrou como uma alternativa viável para garantir a desinfecção do lodo, e torná-lo próprio para a aplicação na agricultura, conforme a legislação vigente.

As características físico-químicas e microbiológicas obtidas após a estabilização permitiram classificar o material, como fertilizante orgânico Classe D, segundo os critérios do MAPA. E isso pode representar uma fonte de economia para as companhias de saneamento, pois permite reduzir significativamente os custos com gestão do lodo, principalmente com o transporte e a disposição. Além de ser uma medida sustentável.

Os indicadores econômicos de rentabilidade VPL e TIR aplicados no tratamento e na destinação do lodo foram viáveis e atrativos, respectivamente, tanto para o cenário I, quanto ao cenário II, o que pode garantir o investimento nas Estações de Tratamentos de Esgotos, nos dois casos a TIR foi superior a TMA aplicada, o que afirma a viabilidade do projeto.

O *payback* descontado, indicou a recuperação dos valores investidos em um médio prazo no cenário I, e em curto prazo no cenário II, confirmando a atratividade da implantação de um projeto de compostagem de lodo, como alternativa para o gerenciamento desse resíduo para as empresas de saneamento, que tiverem área disponível para operacionalizá-lo.

Acredita-se que a realização dos testes de maturação (estabilidade biológica e fitotoxicidade) e de germinação, seja uma recomendação considerável, a fim de garantir a aplicabilidade do composto em solo, e a avaliação da comercialização do composto obtido, se faz recomendável, a fim de obtenção de receita acessória à concessionária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDUL R., VINEET S. S., JUN H., Wafa D., DIONYSIOS D. D., WEI W., MING Z., Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review, Chemical Engineering Journal, Volume 337, 2018, Pages 616-641, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717322714>).
2. ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Classificação de Resíduos Sólidos. NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.
3. ABREU, A. H. M. Reciclagem agrícola e florestal de lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro. 2017. 83 f.
4. ABUSOGLU, A., OZAHİ, E., İHSAN KUTLAR, A., AL-JAF, H., 2017. Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production. J. Clean. Prod. 142, 1684e1692.
5. ANDRADE, J. C.; ABREU, M. F. Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agroambientais. Campinas: IAC, 2006.
6. ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2001.

7. ANDREOLI, C.V. et al. *Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura*. Curitiba: Sanepar, Finep, 1999. 98p.
8. ASSAF NETO, A. Os métodos quantitativos de análise de investimentos. *Caderno de estudos*, v. s., n. 6, p. 1-16, 1992.
9. BLANK, L.; TARQUIN, A. *Engenharia econômica*. 6. ed. São Paulo: Ed. McGrawHill, 2008, 756 p.
10. BRASIL. Ministério da Agricultura e Abastecimento – MAPA. Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009.
11. CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Norma Técnica nº L6.350, Determinação da biodegradação de resíduos – Método Respirométrico de Bartha. São Paulo, CETESB, 1990.
12. CHEN, H. M. et al. Nontyphoid Salmonella infection: Microbiology, clinical features, and antimicrobial therapy *Pediatrics and Neonatology*, jun. 2013.
13. CHENG Z., ZHANG L., ZHAO-LIN H., MING D., XIAO-LONG Y., PING N. A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: Addition of different inocula at three stages of composting, *Waste Management*, Volume 40, 2015, Pages 38-43, ISSN 0956-053X.
14. CHIBA, MARCIO KOITI, MATTIAZZO, MARIA EMÍLIA E OLIVEIRA, FERNANDO CARVALHO. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto: II - Fertilidade do solo e nutrição da planta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online]. 2008, v. 32, n. 2 [Acessado 11 Novembro 2022], pp. 653-662. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200020>>. Epub 30 Jun 2008. ISSN 1806-9657. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200020>.
15. CÓ JÚNIOR, CARAMO, MARQUES, MARCOS O. E TASSO JÚNIOR, LUIZ C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola* [online]. 2008, v. 28, n. 1 [Acessado 11 Novembro 2022], pp. 196-203. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100020>>. Epub 18 Abr 2008. ISSN 1809-4430. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100020>.
16. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002. Resolução nº 316, 29 de outubro de 2002.
17. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020. Resolução nº 498, 19 de agosto de 2020.
18. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020. Resolução nº 499, 06 de outubro de 2020.
19. FERNANDES, S.A.P.; SILVA, S.M.C.P. da. *Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos*. Londrina: Prosab, Finep, 1999. 84p.
20. FONTENELE, RES; VASCONCELOS, ON de. Viabilidade financeira e econômica de projetos de saneamento: aplicação ao sistema de abastecimento da cidade de Milha, no Ceará. *ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP)*, v. 26, 2006.
21. GASPAR, L., et al. Análise econômico-financeira do gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos em uma agroindústria de processamento mínimo de hortaliças. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, p. 477-488, 2020.
22. HALLEY, E.; MILLER, G. A. “Backward” approach to sludge management. *Water Engineering & Management*. v. 9, p. 36-39, 1991.
23. HANG X., CHENSHUO L., WEI C., ZHEN S., ZHIGANG L., TAOYUAN C., YUETING W., YANG L., CHUNHUI L., JIAN L., Effects of pipe material on nitrogen transformation, microbial communities and functional genes in raw water transportation, *Water Research*, Volume 143, 2018, Pages 188-197, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.040>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135418304901>).
24. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 29 jan. 2021.
25. INÁCIO, C.T.; MILLER, P.R.M. *Compostagem: Ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 156 p. ISSN 0043-1354,

- <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.040>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135418304901>).
26. KIEHL, E.J. Manual de Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto. Piracicaba, 2002, 171p.
 27. KIEHL, E.J. Manual da Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto. 4. ed. Piracicaba. 2004. 173 p.
 28. LATHAM, J.L. Elementary reaction kinetics. Edgard Blücher, São Paulo, 1974.
 29. MARION, J.C. Contabilidade rural. 14. ed. São Paulo: Atlas, 2014. 274 p.
 30. MELCHIOR, S.C.; CAMARGO, M.L.; CONEGLIAN, C.M.R.; BRITO, N.N.; LOPES, T.A.; BARROS, R.M.; SOBRINHO, G.D.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. Tratamento de efluentes por processo de lodos ativados. III Fórum de Estudos Contábeis. Rio Claro – SP. 2003.
 31. QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S., MELO, W. J. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. Nucleus, v. 8, n. 1, p. 183-912, 2011 <http://dx.doi.org/10.3738/nucleus.v8i1.527>.
 32. RIBEIRO, Lívia Cristina. Compostagem de lodo de esgoto: caracterização e bioestabilização. 2018.
 33. RODELLA, A. A.; SABOYA, L. V. Calibration for conductimetric determination of carbon dioxide. Soil Biology & Biochemistry, Oxford, v. 31, p. 2059-2060, 1999.
 34. SMIDERLE, J., Estudo de Viabilidade para Destinação Final do lodo da ETA Laranjal/RJ. Rio de Janeiro, UFRJ, 2016.
 35. SPINOSA, L., AYOL, A., BAUDEZ, J., CANZIANI, R., JENICEK, P., LEONARD, A., ET AL., 2011. Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management. Water 3, 702–717.
 36. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Under 40 CFR Part 503. Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Appendix I -Test Method for Detecting, Enumerating, and Determining the Viability of Ascaris Ova in Sludge, p. 166, EPA/625/R-92/013, 2003.
 37. VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Lodos Ativados, v.04. Minas Gerais: ABES, 1997.
 38. XINYU C., SHUANG L., YUNHE G., YAN Y., MOHAMED E., XIANMING S., Effects of microwave, thermomechanical and chemical treatments of sewage sludge ash on its early-age behavior as supplementary cementitious material, Journal of Cleaner Production, Volume 258, 2020, 120647, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120647>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620306946>).
 39. WEI H., PENGKANG J., DAWEI C., XIONGKE L., HU J., RUI W., YONGJUN L., Resource reclamation of municipal sewage sludge based on local conditions: A case study in Xi'an, China, Journal of Cleaner Production, Volume 316, 2021, 128189, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128189>, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621024070>).
 40. WEIXING L., CRISTINA MARIA I., FRANCESCO C., XIANGPING H., DAFANG F., Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: A case study in Kunshan, China, Journal of Cleaner Production, Volume 287, 2021, 125046, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125046>.
 41. ZHEN, G., ZHAO, Y., 2017. Chapter one - sewage sludge generation and characteristics. In: Guangyin, Z., Youcai, Z. (Eds.), Pollution Control and Resource Recovery for Sewage Sludge. Butterworth-Heinemann, pp. 1–11.