



III-005 - ANÁLISE DE ASPECTOS TÉCNICOS, SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS PARA TOMADA DE DECISÃO QUANTO À GESTÃO REGIONAL DE LODO DE ESGOTO: UM MODELO CONCEITUAL

Jamile Gonsalves Oliveira dos Santos⁽³⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Faculdade de Ciência e Tecnologia (Área 1 DeVry). Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento pelo Programa de Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento (MAASA/UFBA). Doutoranda em Engenharia Industrial pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial (PEI) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Endereço⁽³⁾: Rua Prof. Aristides Novis nº 02 Federação, CEP: 40210-630 - Brasil - e-mail: jamile.gonsalves@ufba.br

Eduardo Henrique Borges Cohim Silva⁽⁴⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestre em Tecnologias Limpas pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Doutor em Energia e Meio Ambiente pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Professor Titular da Universidade de Feira de Santana (UEFS).

Endereço⁽⁴⁾: Feira de Santana - BA - CEP: 44036-900 - Brasil - e-mail: edcohim@gmail.com

Márcio André Fernandes Martins⁽⁵⁾

Engenheiro Químico e Mestre em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Doutor em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo (USP). Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA.

Endereço⁽³⁾: Rua Prof. Aristides Novis nº 02 Federação, CEP: 40210-630 - Brasil - e-mail: marciomartins@ufba.br

Francisco Ramon Alves do Nascimento⁽⁵⁾

Engenheiro Ambiental pela Faculdade de Tecnologia e Ciências (FTC). Doutor e mestre em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA.

Endereço⁽³⁾: Rua Prof. Aristides Novis nº 02 Federação, CEP: 40210-630- Brasil - e-mail: francisco.ramon@ufba.br

RESUMO

O saneamento básico é uma questão fundamental para a saúde pública e preservação dos ecossistemas naturais, porém o Brasil ainda enfrenta desafios significativos para garantir o tratamento adequado do esgoto, com variações consideráveis entre diferentes regiões do país em termos de cobertura e eficiência dos sistemas de tratamento. O aumento da cobertura do esgotamento sanitário está diretamente associado ao aumento da geração de lodo que possui potencial de contaminação dos ecossistemas, devendo ser destinado adequadamente. O lodo possui característica que possibilita o aproveitamento na agricultura e indústrias para o aproveitamento na produção de materiais da construção civil e energético. A avaliação de aspectos técnicos, ambientais, socioeconômicos e bem como a integração entre setores são essenciais para a identificação das oportunidades de sinergias e o sucesso da gestão do lodo de esgoto. Neste contexto, ações de simbiose industrial combinadas com análises de dinâmica de sistema surgem como uma estratégia de gestão que promove o fechamento de ciclos produtivos, preservação de ecossistemas e desenvolvimento socioeconômico de uma região.

PALAVRAS-CHAVE: Dinâmica de sistemas, Lodo de esgoto, Recuperação de recursos e Simbiose industrial.



INTRODUÇÃO

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no Brasil a cobertura de esgotamento sanitário em 2022 foi de 56% da população, o que equivale a aproximadamente 112,8 milhões de pessoas. Esse dado inclui a coleta de esgoto, enquanto o percentual de tratamento do esgoto coletado foi de apenas 52,2%. Esses números indicam que ainda há um grande desafio a ser enfrentado no setor saneamento, especialmente em regiões como o Norte e Nordeste, onde apenas 14,7% e 31,4% da população respectivamente, têm acesso a redes de esgoto, contrastando com a região Sudeste, que tem cobertura de 80,9%.

A universalização dos serviços de saneamento implica na implantação e ampliação dos sistemas de coleta e tratamento de águas residuais e os principais fatores que contribuem para o alcance desta meta incluem investimentos em infraestruturas, capacitação técnica de profissionais, integração entre setores, gestão eficiente de recursos, elaboração e disseminação de políticas públicas e instrumentos regulatórios (Silva; Ledo, 2023). O aumento da cobertura de redes coletoras e sistemas de tratamento de esgotos está diretamente relacionada ao aumento da saúde e qualidade de vida da população, mas também da geração dos subprodutos oriundos destes sistemas (Bittencourt; Aisse; Serrat, 2017).

As redes coletoras de esgoto são compostas por sistemas de tubulações que transportam a água residual e os resíduos sólidos provenientes de residências, indústrias e comércios até as estações de tratamento de esgoto (ETEs). As ETEs são formadas por um conjunto de unidades de tratamento e equipamentos que tem por finalidade reduzir as cargas poluidoras do esgoto sanitário e realizar o tratamento da matéria residual resultante (Brasil, 2020). Existem tecnologias diversas para o tratamento de esgotos que utilizam processos físico-químicos ou biológicos, sendo o último o mais empregado nas ETEs brasileiras (Gonçalves; Mol, 2021). O processo de tratamento geralmente é dividido em três níveis: primário (remoção de sólidos grosseiros), secundário (decomposição da matéria orgânica) e terciário (remoção de nutrientes e outros contaminantes específicos) (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014).

Dentre os subprodutos gerados durante o tratamento estão escumas, gases de efeito estufa (GEEs), efluente tratado, e o lodo de esgoto que destaca-se como o resíduo sólido mais representativo. Por se tratar de um resíduo sólido, a gestão do lodo deve atender às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei 12.305/2010 que no artigo 9º estabelece a ordem de prioridade para gestão dos resíduos sendo a não geração, redução e reutilização o foco principal da gestão seguido por reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

O gerenciamento do lodo é um desafio para o setor no âmbito técnico e econômico, representando até 60% dos custos operacionais das ETEs (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014; Moura et al., 2020) e potenciais riscos ambientais associados à disposição final como emissões de GEEs e contaminação de solos e corpos d'água (Ding et al., 2021). Composto basicamente de água, microrganismos, matéria orgânica e inorgânica, o lodo pode ser considerado um recurso de valor agregado, com aplicações em diversos setores da economia, seja na recuperação de nutrientes na agricultura, produção de recursos energéticos ou regeneração de materiais para as indústrias (Pradel et al., 2016; Ding et al., 2021).

O aproveitamento e a reciclagem do lodo de esgoto são práticas realizadas com sucesso em vários países do mundo, inclusive em algumas regiões do Brasil. Uma das principais formas de reciclagem do lodo é a aplicação na agricultura como fertilizante, após processos de tratamento que garantem a eliminação de patógenos e a estabilização da matéria orgânica transformando-o em biossólidos. Rico em nutrientes como nitrogênio e fósforo, o biossólido pode melhorar a qualidade do solo atuando como um condicionador e promove o aumento da produtividade agrícola pela liberação prolongada de nutrientes (Bittencourt; Aisse; Serrat, 2017).

Na indústria da construção civil a recuperação de elementos como Fe_2O_3 , K_2O identificados no lodo em concentrações semelhantes às encontradas na argila propicia a substituição parcial do mineral na produção de artefatos cerâmicos. Análises realizadas nas cinzas de lodo determinaram concentrações de óxidos como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 o que conferem características de materiais pozolânicos ao material, permitindo a incorporação na produção de cimentos (Vaithiyasubramanian et al., 2022; Silva et al., 2015; Correia et al. 2005). A recuperação energética também é uma destinação interessante por meio do aproveitamento do potencial calorífico da biomassa via incineração do lodo, e de pellets e briquetes produzidos a partir do lodo que podem ser utilizados como combustível sólido em fornos industriais em substituição da lenha e carvão vegetal (Jiang et al. 2016; Borges et al., 2009). Assim sinergias potenciais entre o setor industrial e o setor saneamento são possíveis



beneficiando ambos os setores com a substituição parcial de matérias-prima por materiais equivalentes com valor mais atrativos e fechamento dos ciclos produtivos

Diante deste cenário, as possibilidades de aproveitamento do lodo são objeto desta pesquisa, com finalidade de avaliar fatores e parâmetros para a inserção do lodo nos processos produtivos. Neste contexto, a Simbiose Industrial (SI), ciência que envolve a cooperação entre entidades de diferentes setores por meio da troca de materiais, água e energia e do compartilhamento de serviços, infraestrutura e informações, surge como estratégia para o gerenciamento adequado do lodo, com promoção de benefício mútuo entre as partes envolvidas. Assim, as relações extra-firma podem redefinir a organização industrial, estimulando entidades na adoção de práticas para além das fronteiras individuais, em um nível sistêmico mais amplo (Chertow, 2008).

Para o entendimento da complexidade do aproveitamento de lodo em redes de simbiose industrial, a metodologia de Dinâmica de Sistemas (DS) é uma excelente ferramenta. Os conceitos e princípios da DS proporcionam a compreensão do comportamento dinâmico de sistemas interconectados, a partir das variáveis que mudam ao longo do tempo, as interações entre as variáveis e retroalimentação que podem atenuar ou intensificar o efeito das variáveis do sistema (Meadows, 2022).

OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo construir um mapa conceitual sobre aspectos técnicos, socioeconômicos e ambientais que influenciam na tomada de decisão para gestão regional do lodo de esgoto na perspectiva da Simbiose Industrial.

MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, uma revisão narrativa da literatura foi realizada para identificação de critérios e parâmetros relacionados à gestão regional de lodo de esgoto, como usos potenciais (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014) e políticas aplicáveis nas esferas federal e estadual. Para isso, a busca de artigos para extração de informações técnicas e científicas relacionadas à aproveitamento de lodo de esgoto, simbiose industrial, modelos de tomada de decisão e dinâmica de sistemas foi realizada na base de dados “Web of Science Clarivate Analytics”. Combinações de palavras-chave, associadas aos temas de interesse resultaram nas strings: (“System dynamics” OR “Decision matrix” AND “Industrial symbiosis”) e (“System dynamics” OR “Decision matrix” AND “Sewage Sludge” OR biosolids).

A elaboração do modelo conceitual adaptou as etapas metodológicas utilizadas por Nascimento *et al.* (2018) e Morales e Diemer (2019). As 5 etapas utilizadas para a elaboração do diagrama foram: (i) delimitação do problema e limites do sistema; (ii) desenvolvimento da hipótese dinâmica; (iii) definição das variáveis de níveis que representam acumulações do feedback; e (iv) elaboração do Diagrama de Ciclo Causal (DCC).

A etapa inicial pautou-se na identificação dos principais aspectos associados ao esgotamento sanitário, com foco no gerenciamento do lodo produzido. As variáveis resultantes do sistema foram classificadas como fatores sociais, ambientais, operacionais e econômicos.

A hipótese dinâmica foi desenvolvida para explicar as tendências do sistema a partir das interações entre as variáveis representadas no DCC. Assim, o DCC desenvolvido introduz o conceito de ciclos de feedback para as principais variáveis impulsionadoras do aproveitamento do lodo de esgoto, foco deste trabalho. As variáveis são interligadas por meio de setas com sinal positivo (+), que representam efeitos na mesma direção, o que significa que se a variável for intensificada, a variável resultante se intensificará também. As setas com sinal negativo (-) representam efeitos em direções opostas, ou seja, quando a variável for intensificada a resultante será amenizada, sendo o oposto verdadeiro (Urban, 2016; Diemer; Morales, 2019; Nascimento *et al.*, 2019).

O modelo conceitual de gestão regional de lodo de esgoto, foi desenvolvido com base na hipótese dinâmica elaborada, subsidiando a construção do DCC, que foi desenvolvido utilizando o software Vensim PLE versão 10.1.1.



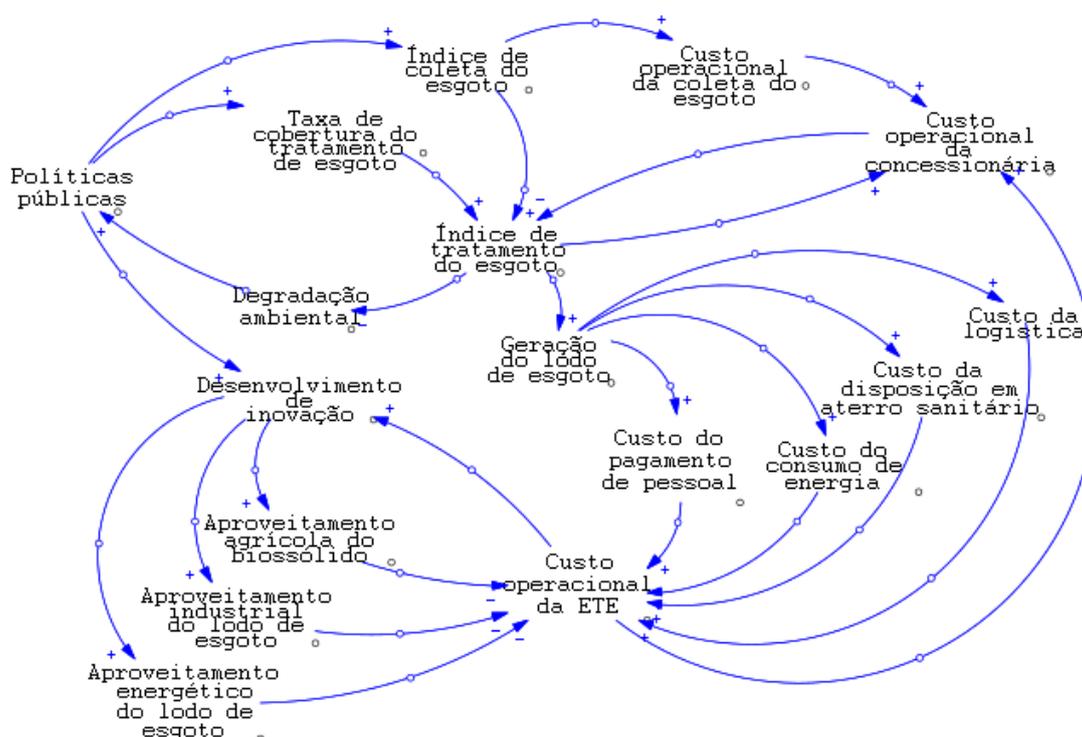
RESULTADOS ESPERADOS OU OBTIDOS



A hipótese dinâmica, representada na Figura 1, foi definida da seguinte forma:

A gestão regional do lodo de esgoto, resíduo gerado em estações de tratamento, focada na recuperação de recursos, como nutrientes, materiais e energia e promoção de sinergias do setor saneamento com os setores agrícola, energético e industrial, pode impulsionar a competitividade dos setores, promover o desenvolvimento socioeconômico da região e melhorar o desempenho ambiental do ecossistema industrial, benefícios que impulsiona a inovação no sistema para expansão das práticas de aproveitamento do lodo de esgoto na perspectiva de uma retroalimentação positiva.

Figura 1. Diagrama de ciclo causal da gestão do lodo de esgoto



Fonte: Elaboração própria, 2024.

O aumento dos índices de coleta e tratamento de esgoto refletem diretamente no aumento do *Custo operacional da concessionária*, devido à implantação de ETEs. A *Geração do lodo de esgoto* é um dos aspectos que demanda atenção em uma ETE devidos a complexidade do tratamento e gerenciamento que envolve as etapas como adensamento, estabilização, desidratação e destinação final, que podem representar até 60% dos custos (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014).

A quantidade de lodo final gerada em uma ETE está diretamente relacionada com o tamanho da população atendida, massa per capita e os métodos de tratamento, quanto maior o nível (primário, secundário, terciário) maior será a geração de lodo e a demanda de energia (Christodoulou; Stamatelatos, 2016). Tomando como base estimativas de produção per capita de lodo na ordem de 0.1 a 0.15 L.hab⁻¹.dia⁻¹ (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014) e o volume de esgoto tratado, no Brasil são geradas cerca de 300 mil a 450 mil toneladas de lodo mensalmente. O aumento da *Geração do lodo de esgoto* provoca o aumento do *Custo operacional da ETE* e consequentemente o *Custo operacional da concessionária* (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014), sendo



o *Custo de pagamento de pessoal e Custo do consumo de energia*, as principais despesas, representando cerca de 75% dos custos totais (Santos, 2018).

No Brasil a destinação do lodo a aterros sanitários é a alternativa mais praticada pelas concessionárias, o que além de elevar os custos do gerenciamento menospreza elementos de valor agregado (Chernicharo *et al.*, 2015). Isto ocorre porque este material é tratado como um resíduo, quando na verdade trata-se de um recurso renovável com potencial de aproveitamento devido às características que possui (Peltola *et al.* 2023), tornando a etapa de destinação final uma oportunidade de *Desenvolvimento de inovação* no setor saneamento a partir de sinergias com os setores para o *Aproveitamento agrícola do biofóssido*, *Aproveitamento energético do lodo esgoto* e o *Aproveitamento industrial do lodo de esgoto*. Assim, esta estratégia de gestão pautada na recuperação de recursos pode contribuir para a redução do *Custo operacional da ETE* devido à eliminação ou redução do *Custo da disposição final em aterro sanitário* (Chernicharo *et al.*, 2015; Kor-Bicakci; Eskicioglu, 2019).

As metas de universalização dos serviços de saneamento fomentam a implementação de *Políticas públicas*, que podem impulsionar o aumento da *Taxa de cobertura do tratamento de esgoto* e a prevenção da *Degradação ambiental* (Borja, 2014). Isso gera um ciclo virtuoso no sistema, uma vez que a melhoria do desempenho ambiental favorece a expansão e aprimoramento das *Políticas públicas* e isso pode ser observado principalmente no histórico de países desenvolvidos que adotaram políticas voltadas para a eficiência e otimização dos serviços de saneamento nas décadas passadas.

No ano de 1970, a regulamentação do aproveitamento do lodo de esgoto tratado era avaliada nos Estados Unidos da América (EUA), o que resultou na 'Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge'(40 CFR Part 503 rule) legislação publicada em 1993 voltada para o uso e valorização do lodo higienizado na forma de biofóssido. Esta lei estabelece requisitos e parâmetros como valores máximos permitidos para substâncias químicas e patógenos, métodos de tratamento, padrões de controle para promoção de tecnologias de gerenciamento, descarte e monitoramento. A partir desta regulamentação, o biofóssido ganhou valor de mercado sendo reconhecido como uma fonte de nutrientes possibilitando a aplicação na agricultura, paisagismo, silviculturas e na recuperação de áreas. Porém, a partir dos anos 2000 a opinião pública colocou em questão segurança do uso do biofóssido na agricultura, e em alguns estados dos EUA a pressão social foi tão forte que culminou na proibição do uso para esta finalidade, mesmo os produtos estando sob um esquema regulatório de mercado, demonstrando a importância da participação social nos processos decisórios (Christodoulou; Stamatelatos, 2016).

No Japão, a Lei de Esgoto de 1970 estabeleceu um marco no gerenciamento de lodo de esgoto, com o objetivo de melhorar a saúde pública e a qualidade da água. A legislação exigia que os governos locais desenvolvessem planos abrangentes para sistemas de esgoto, considerando fatores como topografia e uso do solo, e estabeleceu diretrizes para a redução de poluentes no esgoto tratado. Embora não detalhasse todas as práticas de tratamento de lodo, a lei incentivou o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para tratar o lodo como um recurso. No entanto, somente a partir da década de 1990 as políticas de gestão de lodo evoluíram para incluir tecnologias avançadas como digestão anaeróbica e incineração, promovendo o uso do lodo tratado principalmente na agricultura para reduzir a dependência de fertilizantes químicos importados e estabilizar os preços dos alimentos, e na construção civil em um esforço contínuo para maximizar a recuperação de recursos e minimizar o impacto ambiental (Christodoulou; Stamatelatos, 2016; Matsumiya, 2014).

Em 1991 a União Europeia (UE) publicou a Diretiva 91/271/CE que introduziu normas mais restritivas para o tratamento de esgotos, causando impacto nos sistemas de tratamentos que precisaram aumentar a eficiência dos processos e por consequência a geração do lodo de esgoto (Bertanza *et al.*, 2019). Para gerenciar o crescente volume de lodo nas ETEs, a UE lançou o programa Rotas que estabelece diretrizes para a redução da produção de lodo, aprimoramento do tratamento para aplicação na agricultura e recuperação de recursos seguindo a ordem de prioridade estabelecida na Diretiva 08/98, que hierarquiza a forma de gestão de resíduos que deve ser seguida pelos países membros da UE. Enquanto a Diretiva 86/278/EEC estabelece requisitos de qualidade do lodo definindo limites máximos para concentrações de metais pesados promovendo o uso seguro do lodo na agricultura, alinhando-se com as políticas de economia circular da UE (European Commission, 2022).



O Brasil possui legislações federais (Quadro 1) e estaduais que estabelecem requisitos e diretrizes para a gestão adequada do lodo de esgoto. Assim, o aproveitamento de lodo esgoto é uma atividade regulamentada, passível de licenciamento junto a órgão ambiental e a comercialização dos produtos agrícolas com lodo incorporado deve ser autorizado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Brasil, 2014). Todavia, a prática de destinação visando a recuperação de recursos ainda não é comum, sendo adotada por poucas concessionárias concentrada em algumas regiões do país como os estados de São Paulo, Rio Grande do Sul, Distrito Federal, destacando-se o Estado do Paraná (Bittencourt; Aisse; Serrat, 2017).

Quadro 01. Legislações federais para gestão e gerenciamento do lodo de esgoto

Aspectos legais	Tipo de aplicação	Descrição	Observações importantes
Lei nº 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos	Gestão	Institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos; enfatiza a logística reversa e planos de gerenciamento de resíduos.	Promove a gestão integrada de resíduos sólidos, incluindo o lodo de esgoto, com foco na redução, reutilização e reciclagem.
Decreto nº 10.936	Gerenciamento	Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos, definindo responsabilidades e instrumentos para sua implementação.	Detalha os instrumentos da PNRS, como planos de resíduos sólidos e inventários; estabelece normas para a disposição ambientalmente adequada de resíduos.
Resolução CONAMA nº 498/2020	Gerenciamento	Altera a Resolução CONAMA 375/2006 (Revogada), atualizando critérios e procedimentos para a utilização do lodo de esgoto em áreas agrícolas e definindo novos parâmetros de qualidade e segurança.	Atualiza os critérios para uso agrícola do lodo; reforça os padrões de qualidade e segurança para prevenir riscos à saúde e ao meio ambiente
Lei nº 14.026/2020	Gestão	Atualiza o marco legal do saneamento básico, ampliando as diretrizes e metas para universalização dos serviços de saneamento, incluindo a gestão do lodo de esgoto.	Reforça a regulação dos serviços de saneamento; promove investimentos privados e metas de universalização até 2033.
Decreto nº 10.588/2020	Gestão	Regulamenta a Lei do Saneamento Básico, atualizando diretrizes para o saneamento e gestão de resíduos, incluindo o lodo de esgoto.	Visa a modernização e a melhoria da infraestrutura de saneamento no Brasil, promovendo a universalização dos serviços e incentivando a participação do setor privado, ao mesmo tempo em que busca assegurar a regulação, a qualidade e a sustentabilidade desses serviços.

As legislações federais dividem-se entre as de Gestão, como a PNRS que abrange aspectos estratégicos estabelecendo diretrizes, padrões e parâmetros que auxiliam na tomada de decisão para a destinação de resíduos sólidos incluindo o lodo, e as de Gerenciamento como a CONAMA 498/2020 que tem como objetivo estabelecer critérios, parâmetros e procedimentos operacionais voltados para execução das atividades de destinação. A



aplicação das leis e regulamentos, resoluções, normativas e portarias específicas de órgãos ambientais e de saneamento estaduais ou municipais complementam as diretrizes e estabelecem critérios mais detalhados para o tratamento e uso do lodo, promovem a sustentabilidade local e fomenta a criação de sinergias ao podendo direcionar ações voltadas à integração de setores.

Com base nos requisitos estabelecidos nas legislações federal Conama 498/2021 que estabelece critérios e procedimentos para a utilização do lodo de esgoto em áreas agrícolas, na Política Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (Lei Estadual nº 20.607/2021) que estabelecer diretrizes, objetivos, instrumentos e responsabilidades para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no Estado do Paraná, e na Resolução da Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Paraná (SEMA) nº 021/2009 que regulamenta o licenciamento ambiental no Estado do Paraná, estabelecendo condições e padrões ambientais para as atividades potencialmente poluidoras, a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) desenvolve o Programa de Destinação Agrícola do Lodo de Esgoto. O Programa realiza a doação de lotes de lodo para aplicação agrícola como substituto de adubos após serem submetidos a higienização via estabilização alcalina prolongada (EAP), que consiste na adição de produto alcalino para elevação do pH do lodo seguido de processo de cura que dura cerca de 30 dias para eliminação dos organismos patogênicos (Brasil, 2021). Nos últimos 20 anos a concessionária obteve excelentes resultados com o programa, alcançando a marca de 420 mil toneladas de lodo aplicadas em cerca de 3 mil hectares em todas as regiões do Estado. Somente em 2022, foram contabilizadas uma média de 23 mil toneladas de lodo, que beneficiaram 157 agricultores (Sanepar, 2024).

Em São Paulo a parceria entre a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e a Universidade Estadual Paulista criou o programa Saberfertil, que foi fundamental para a implementação de tecnologias avançadas e práticas de gestão de lodo eficiente. Desde 2018 a ETE que possui capacidade de processamento de 25 toneladas/dia obteve a aprovação do Ministério da Agricultura para produção e comercialização do bio sólido produzido e obedece aos requisitos da estabelecidos na Conama 498/2020 direcionando a aplicação do bio sólido para uso agrícola e recuperação de áreas degradadas (Sabesp, 2022).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os sistemas de esgotamento sanitário são cruciais para a saúde pública, mas muitas regiões do Brasil enfrentam lacunas de cobertura. Os altos custos associados à coleta e tratamento de esgoto são um dos principais motivos para esse déficit, sendo as despesas com pessoal e serviços terceirizados os mais significativos (Pessoa, 2019).

A modelagem do complexo sistema operacional de uma ETE por meio de DS é uma representação simplificada das interações entre variáveis, mas pode resultar em conclusões aparentemente contraditórias. O aumento na *Taxa de cobertura do tratamento de esgoto* pode inicialmente elevar os *Custos operacionais da coleta e tratamento*, indicando um ciclo de feedback positivo em que um acréscimo nesta variável aumentaria o *Custo operacional da coleta de esgotos* e consequentemente o *Custo operacional da concessionária*. Porém, a expansão dos sistemas pode eventualmente diluir os custos fixos, e proporcionar um retorno significativo para a sociedade (Urban et al., 2023). Estima-se que cada dólar investido em saneamento pode gerar entre 5 e 28 dólares para a economia (UNESCO, 2015), e os benefícios para a saúde pública podem chegar a até R\$241 mil por morte evitada (Mendonça; Motta, 2005; BNDES, 2021).

No Brasil, os sistemas de tratamento anaeróbio foram expandidos, sendo o país com maior quantidade de digestores anaeróbios tipo UASB (Chernicharo, 2018). Isso devido a eficiência na remoção de MO, baixa produção de lodo e custos de implementação e operação inferiores aos de sistemas aeróbios convencionais (Bressani-Ribeiro et al., 2019). O custo de tratamento para população maior que 50 mil habitantes, utilizando sistema UASB combinado com lodos ativados, é em média R\$1,55 m⁻³, com a maior parte dos custos associados a pessoal e energia (Santos, 2018; Souza et al., 2021).

O tratamento do lodo de esgoto é um desafio em ETEs quanto ao descarte final. No entanto, o lodo pode ter valor agregado quando transformado em bio sólido ou em subprodutos com potencial de aproveitamento. A produção de bio sólidos na ETE Lageado, em Botucatu-SP custa entre R\$ 80,0 e 125,30 t⁻¹, sendo mais barato que a disposição em aterros sanitários (em média R\$ 255,00 t⁻¹), representando um ciclo de feedback negativo que reduz os Custos operacionais da ETE (Martins et al., 2021). Assim, do ponto de vista técnico e econômico,



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL



o aproveitamento de lodo está frequentemente associado à redução de custos, fortalecendo a competitividade e desenvolvimento dos setores envolvidos. A mudança de estratégia do gerenciamento do lodo no setor saneamento, além de reduzir os custos operacionais, pode ampliar o escopo de serviços com a venda do subproduto, podendo contribuir para o aumento da receita do setor.

O desenvolvimento de inovações tecnológicas no gerenciamento do lodo, com a colaboração de instituições de pesquisa, pode melhorar a operação das ETEs e apoiar decisões que promovam desenvolvimento econômico regional, bem-estar social e ambiental (Urban; Isaac; Morita, 2019). Porém, a procura de caminhos sustentáveis para a gestão e utilização de lodo deve ir além da confiança na ciência e na inovação, uma vez que a política inevitavelmente desempenha um papel na forma como a sociedade abordará os problemas associados à gestão de lodo de esgoto (Bagheri et al., 2023). Outro aspecto a ser considerado para viabilizar a gestão benéfica do lodo, é levar em conta a opinião do consumidor, pois o fator de rejeição pode ser determinante para a disseminação das práticas de aproveitamento. Para superar isso, o envolvimento público nos procedimentos de tomada de decisão deve ser incentivado (Christodoulou; Stamatelatos, 2016).

Com o histórico de gestão de lodo de esgoto da UE, Japão e EUA observa-se que entre a decisão das destinações, elaboração de políticas e a adoção das práticas nos territórios possui um espaço de tempo (delay), que pode levar décadas para disseminar e consolidar as atividades. Ainda que existam resoluções que dispõem sobre o aproveitamento do lodo de esgoto, observa-se a necessidade da elaboração de políticas públicas para gestão territorial do lodo que promova a integração entre os setores, visando o fortalecimento dos aspectos técnicos regulatórios. Para isto, o envolvimento das partes interessadas resultaria em políticas mais alinhadas com a realidade local promovendo resultados promissores nos âmbitos técnico, econômico e socioambiental. Nesta perspectiva, as oportunidades de desenvolvimento associadas a um novo modelo de gestão de recursos alicerçados nos princípios da simbiose industrial, promove o fortalecimento da cidadania e dos direitos individuais, redução dos custos de transação (transportes, fertilizantes), possibilidade de aumento da renda, o acesso aos equipamentos sociais, acesso a bens (maquinário), e a redução de riscos e vulnerabilidades sociais.

CONCLUSÕES

A decisão da melhor alternativa para destinação final do lodo de uma ETE deve considerar um conjunto de variáveis considerando características físico-químicas e microbiológicas do lodo, questões ambientais, de infraestrutura, aspectos legais e geográficos como distância de áreas agrícolas, industriais ou de aterros licenciados. O gerenciamento adequado do lodo é uma atividade que pode beneficiar concessionárias, o poder público, setores produtivos e a sociedade de forma mútua. Neste cenário os critérios legais desempenham um papel importante para os processos decisórios e devem ser avaliados, pois o sucesso do gerenciamento do lodo de esgoto a nível regional está diretamente relacionado à elaboração e implementação de políticas públicas que promovam saúde pública, prevenção da degradação ambiental e a integração entre setores.

Os benefícios de um sistema sinérgico voltado para a gestão do lodo com foco no aproveitamento, perpassa pelos âmbitos econômico, ambiental e social, podendo possibilitar a otimização de recursos e o fortalecimento da competitividade das indústrias com a substituição de matérias-primas e a elaboração de políticas que despertem o interesse dos atores envolvido em articularem-se na busca de técnicas de produção mais inovadoras, eficientes e mais sustentáveis. Assim, uma ferramenta que permita uma abordagem holística integrada deste sistema surge como um catalisador para a formação de redes de simbiose industrial, ao indicar as possibilidades associadas à destinação do lodo de esgoto.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. 2014. **Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final** 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 444 p.
2. MEADOWS, D. H. **Pensando em sistemas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Sextante, 2022. 256 p.
3. BAGHERI, Marzieh; BAUER, Torben; BURGMAN, Linus Ekman; WETTERLUND, Elisabeth. Fifty years of sewage sludge management research: mapping researchers' motivations and concerns. **Journal of Environmental Management**, v. 325, n. 116412, 2023.
4. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **Impactos de investimentos em água e esgoto sobre indicadores de saúde**. v. 3, n. 7. Departamento de Efetividade e Pesquisa Econômica, 2021.
5. BITTENCOURT, 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**, v. 22, n. 6, p. 1129-1139, 2017.
6. BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, v.17, p.27-32, 2009.
7. BORJA, P. C. Política pública de saneamento básico: uma análise da experiência brasileira recente. **Saúde e Sociedade**, v. 23, n. 2, p. 432–447, 2014.
8. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Governo Federal, 2010.
9. BRASIL. Decreto nº 8.384, de 29 de dezembro de 2014. Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília: Governo Federal, 2010.
10. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.
11. BRASIL. Decreto nº 10.588, de 24 de dezembro de 2020. Dispõe sobre o apoio técnico e financeiro de que trata o art. 13 da Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, sobre a alocação de recursos públicos federais e os financiamentos com recursos da União ou geridos ou operados por órgãos ou entidades da União. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.
12. BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 61, de 23 de dezembro de 2020. Altera os procedimentos para a classificação do trigo. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.
13. BRESSANI-RIBEIRO, T.; *et al.* L. Constraints, performance and perspectives of anaerobic sewage treatment: lessons from full-scale sewage treatment plants in Brazil. **Water Science and Technology**, v. 80, n. 3, p. 418–425, 2019.
14. CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 453–462, 2016.
15. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 498. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.
16. COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de Sustentabilidade**. São Paulo, 2022.



17. COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. **Sabesp transforma lodo gerado no tratamento de esgoto em adubo**. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaoId=65&id=7905>. Acesso em: 01 jun. 2024.
18. CORREIA, S.L.; BLOOT, M.V.; FOLGUERAS, M.V.; HOTZA, D. Caracterização físico-química de argilas da região norte de Santa Catarina. **U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information**, 2009.
19. DING, A.; *et al.* Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review. **The Science of the Total Environment**, v. 769, n. 144451, 2021.
20. EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL FOR THE ENVIRONMENT. Support for the evaluation of the Sewage Sludge Directive - Final implementation report, Publications Office of the European Union, 2022.
21. GONÇALVES, D. B.; MOL, M. P. G. Destinação Final de Lodo de Esgoto: Proposição para auxílio em tomadas de decisão a partir de uma revisão de literatura. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica**, v. 14, n. 1, p. 90, 2021.
22. JIANG, L.; YUAN, X.; XIAO, Z.; LIANG, J.; LI, H.; CAO, L.; WANG, H.; CHEN, X.; ZENG, G. A. Comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties. **Energy Conversion and Management**, v. 126, p. 509–515, 2016.
23. MARTINS, S. F.; *et al.* Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, v. 36, n. 2, p. 218–229, 2021.
24. MOURA, A. F. F. *et al.* Energy reuse of sewage treatment plant sludge - a review. **Journal of Chemical Engineering and Chemistry**, v. 6, n. 5, p. 740–747, 2020.
25. MENDONÇA, M. J. C.; MOTTA, R. S. Saúde e saneamento no Brasil. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 30, 2022.
26. PARANÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução SEMA nº 021 de 22 de abril de 2009. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba, n. 7.962, p. 13-16.
27. POGGERE, G. C.; SERRAT, B. M.; MOTTA, A. C. V.; BITTENCOURT, S.; DALPISOL, M.; ANDREOLI, C. V. Lodos de esgoto alcalinizados em solos do estado do Paraná: taxa de aplicação máxima anual e comparação entre métodos para recomendação agrícola. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 429-438, dez. 2012.
28. RUSĂNESCU, C. O.; VOICU, G.; PARASCHIV, G.; BEGEA, M.; PURDEA, L.; PETRE, I. C.; STOIAN, E. V. Recovery of Sewage Sludge in the Cement Industry. **Energies**, v. 15, n. 7, p. 2664, 2022.
29. SANTOS, F. N. B. **Análise comparativa dos custos operacionais de 44 estações de tratamento de esgoto na região sudeste do Brasil**. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
30. SILVA, F. G.; LEDO, B. C. A. Aspectos regulatórios e seus efeitos no setor de água e esgoto do Brasil. **Revista de Defesa da Concorrência**, v. 11, n. 1, p. 127-148, 2023.
31. SILVA, C. R. L.; CHINELATTO, A. L.; CHINELATTO, A. S. A. Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. **Cerâmica**, v. 61, n. 357, p. 31–40, 2015.
32. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico



temático de serviços de água e esgotos – 2021 Brasília: SNIS, 2022. 92p.

33. SOUZA, B. DE M. *et al.* Custo de operação e manutenção de estação de tratamento de esgotos por reator anaeróbio e lodos ativados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 3, p. 505–515, 2021.
34. UNESCO – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos 2015 – Água para um Mundo Sustentável. 2015.
35. URBAN, R. C. **Metodologias para gerenciamento de lodo de ETA e ETE**. 2016. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.
36. VAITHIYASUBRAMANIAN, R; SRINIVASAN, D.KANAGARAJAN, A. K. Study on preparation of brick blocks by using construction waste and sludge. **Environmental science and pollution research international**, v. 29, n. 48, p. 72528–72544, 2022.