# CENÁRIO LEGAL E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA): UMA REVISÃO

**Lucas de Oliveira Duboc**[1]
Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).
**Isabella Pereira de Lima**[2]
Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).
**Frieda Keifer Cardoso**
Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.
**Lucas de Almeida Chamhum Silva**[3]
Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Diretor do Centro de Referência em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (CR ETES).

**Endereço**[4]**:** Rua Ceará, 1566, 11° andar, Funcionários – Belo Horizonte - MG - CEP: 30150-314 - Brasil - Tel: +55 (32) 98875-0525 - e-mail: lucas.chamhum@cretes.com.br

## RESUMO

O lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETA) constitui um resíduo de gestão complexa, cujo volume e variabilidade físico-química impõem desafios técnicos, ambientais e regulatórios aos sistemas de abastecimento no Brasil e no mundo. Este artigo apresenta uma revisão do panorama legal brasileiro aplicável ao lodo de ETA, abrangendo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), as resoluções CONAMA, normas técnicas da ABNT e regulamentações estaduais como a Resolução CONSEMA-RS nº 461/2022. Complementarmente, são discutidas as principais legislações internacionais adotadas em países como Escócia, Austrália, França, EUA, Canadá e África do Sul. O artigo aborda ainda a caracterização físico-química, mineralógica e microbiológica do resíduo, destacando a variabilidade de parâmetros como pH, DQO, sólidos totais, teores de ferro e alumínio e indicadores microbiológicos. Os resultados da revisão evidenciam a ausência de regulamentação federal específica no Brasil, a inadequação das práticas de disposição em grande parcela dos municípios e o potencial de reaproveitamento do lodo em atividades agrícolas e industriais. Recomenda-se a elaboração de norma técnica federal, o fortalecimento do licenciamento ambiental e o estímulo à pesquisa aplicada para consolidar uma gestão sustentável do lodo de ETA no Brasil.

**Palavras-chave:** Lodo de ETA; Legislação ambiental; Caracterização físico-química.

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento de água para abastecimento público é uma atividade essencial para a saúde pública e para o desenvolvimento socioeconômico. No Brasil, sistemas de tratamento convencionais utilizam, na etapa de coagulação e floculação, produtos químicos como sulfato de alumínio, cloreto férrico ou policloreto de alumínio (PAC), que promovem a remoção de turbidez, cor e material em suspensão presente na água bruta. Como subproduto inevitável desse processo, geram-se volumes expressivos de lodo nos decantadores e nos filtros das ETAs, -material este denominado lodo de ETA ou LETA.

A gestão adequada desse resíduo é uma das principais demandas técnicas e ambientais dos operadores de sistemas de saneamento no país. Segundo dados do IBGE (2017), aproximadamente 1.030 dos 1.825 municípios brasileiros que geram lodo no processo de tratamento de água ainda realizam seu lançamento em corpos hídricos sem tratamento prévio (Rossi *et al*., 2025). Essa prática provoca assoreamento de corpos receptores, redução do oxigênio dissolvido, mortandade de organismos aquáticos e risco de recontaminação dos próprios mananciais utilizados para captação (Rossi *et al*., 2025).

Apesar da relevância ambiental e sanitária do tema, o Brasil ainda carece de regulamentação federal específica para o gerenciamento do lodo de ETA. O arcabouço normativo disponível é fragmentado: a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e escassas regulamentações estaduais e municipais compõem um conjunto heterogêneo de instrumentos que, em conjunto, orientam, mas não determinam com precisão, os critérios para tratamento, reaproveitamento e disposição final desse resíduo.

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivos: (i) sistematizar o panorama legal brasileiro e internacional aplicável ao lodo de ETA; (ii) caracterizar as propriedades físico-químicas, mineralógicas e microbiológicas desse resíduo com base na literatura nacional e internacional; (iii) discutir os desafios de gestão e as lacunas regulatórias; e (iv) propor recomendações para o aprimoramento da legislação e das práticas de manejo. A revisão ora apresentada é pertinente ao momento atual do saneamento brasileiro, especialmente pois o país carece de uma norma federal específica para o gerenciamento do resíduo, o que gera heterogeneidade de procedimentos entre diferentes estados, insegurança jurídica e ausência de critérios técnicos unificados para caracterização, tratamento e destinação do resíduo.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar de forma integrada o enquadramento legal vigente e a caracterização físico-química, mineralógica e microbiológica do lodo de ETA no Brasil, sistematizando leis, normas técnicas, resoluções e regulamentações nacionais e internacionais aplicáveis, bem como os principais parâmetros de qualidade do resíduo, de modo a subsidiar a definição de critérios para sua gestão ambientalmente adequada e para o planejamento de alternativas de tratamento, disposição e reaproveitamento do resíduo

## 3. METODOLOGIA UTILIZADA

Este artigo caracteriza-se como uma revisão narrativa e documental sobre legislação e caracterização de lodo de ETA, fundamentada em fontes técnico-científicas e instrumentos normativos nacionais e internacionais relevantes para o tema. A pesquisa bibliográfica foi conduzida em bases como Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SciELO e no Portal de Periódicos CAPES, complementada por buscas direcionadas em relatórios institucionais (agências ambientais, companhias de saneamento, organismos internacionais) e em normas técnicas e legislações disponíveis em sítios oficiais.

O levantamento da legislação brasileira abrangeu leis federais (PNRS, PNMA, recursos hídricos, saneamento), normas técnicas (por exemplo, ABNT NBR 10.004) e resoluções do CONAMA, além de instrumentos estaduais selecionados, com destaque para a Resolução CONSEMA n.º 461/2022 do Rio Grande do Sul. No âmbito internacional, foram sistematizados guias e relatórios de referência, como o "*Drinking Water Treatment Plant Residuals Management Technical Report*" da USEPA, as diretrizes da *Water Research Commission* (África do Sul), os documentos do *Centre of Expertise for Waters* (Escócia) e guias provinciais canadenses e franceses, permitindo a elaboração de um quadro comparativo sintético do enquadramento jurídico e das opções de destinação do lodo de ETA em diferentes países. A partir desse corpo de evidências, procedeu-se à análise qualitativa dos resultados, estruturando a discussão por eixos temáticos (cenário legal, caracterização do lodo, desafios de gestão e perspectivas de valorização) de forma a articular o contexto brasileiro com as experiências internacionais.

## 4. RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 CENÁRIO LEGAL DO LODO DE ETA

### 4.1.1. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

No contexto brasileiro, o lodo de ETA ainda carece de regulamentação federal específica. O tema é abordado de forma indireta por diferentes leis, normas técnicas e, em alguns casos, por regulamentações estaduais e municipais (Sousa *et al*., 2022).

A classificação do lodo de ETA como resíduo sólido é estabelecida pela NBR 10.004 (ABNT, 2024), que, em geral, o define como resíduo não perigoso (classe II) – isto é, não apresenta características como inflamabilidade, corrosividade, patogenicidade, reatividade e toxicidade. Nesse aspecto, a Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), constitui o principal instrumento federal aplicável ao tema. Essa norma estabelece princípios e diretrizes para a gestão integrada dos resíduos sólidos, com ênfase na hierarquia: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada. Embora a PNRS não trate especificamente do lodo de ETA, seus princípios abrangem resíduos de atividades de tratamento de água e proíbem expressamente o lançamento de resíduos em corpos hídricos ou sua disposição *in natura* a céu aberto.

No âmbito das resoluções do CONAMA destaca-se a Resolução CONAMA nº 498/2020, que estabelece critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos gerados em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Embora não seja aplicável ao lodo de ETA do ponto de vista legal, seus critérios têm sido utilizados em alguns estudos como referência técnica para avaliar o potencial de aproveitamento agronômico desse resíduo.

Em nível estadual, destaca-se a Resolução CONSEMA-RS nº 461/2022 do Rio Grande do Sul, primeira legislação estadual brasileira exclusivamente voltada ao lodo de ETA (CONSEMA-RS, 2022). A norma estabelece parâmetros de caracterização físico-química, limites para metais pesados e critérios para aplicação em solos agrícolas, servindo como referência para futuras regulamentações em outros estados. Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa COPAM nº 245/2022 convoca municípios com ETAs a apresentar unidades de tratamento de lodo para regularização ambiental (COPAM, 2022). No Paraná, a Instrução Normativa IAT nº 37/2025 exige que as ETAs prevejam unidades de tratamento de LETA como parte integrante do licenciamento (IAT, 2025). A Norma Técnica CETESB P4.230/2021, em São Paulo, também tem sido referência para critérios de aplicação de lodo no solo, embora seja originalmente destinada a lodos de esgoto (CETESB, 2021).

### 4.1.2. LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL

Internacionalmente, a maioria das nações não dispõe de regulamentação específica e unificada para o lodo de ETA. Os resíduos de tratamento de água, denominados *Water Treatment Residuals* (WTR), são geralmente enquadrados nas legislações nacionais de resíduos sólidos ou de proteção ambiental, com exigências de caracterização prévia e critérios para disposição.

Na Escócia, o lodo de ETA é regulado pelas *Waste Management Licensing (Scotland) Regulations 2011*, que exigem a emissão de licenças WML pela *Scottish Environment Protection Agency (SEPA)*, órgão ambiental que atua no país, para qualquer forma de gestão do resíduo. A aplicação em solo para fins agrícolas ou ecológicos é permitida desde que acompanhada de plano de aplicação, comprovação de compatibilidade nutricional com a cultura e fiscalização contínua. *O documento mais recente acerca das normas e leis sobre o resíduo no país é* o relatório A*pplying drinking water treatment residuals to land: opportunities and implications* (Gilmour *et al*., 2019), elaborado pelo *Centre of Expertise for Waters* (CREW), organização financiada pelo governo escocês que busca auxiliar na tomada de decisão a partir da conexão entre o governo e os principais centros de pesquisa. O relatório consolida requisitos técnicos e normas para o uso de lodos de ETA no país, como em terras agrícolas, florestais e de restauração, incluindo faixas recomendadas de pH do solo (evitando aplicações em pH < 5,5), parâmetros mínimos de caracterização do resíduo e do solo, limites de carga e taxas de aplicação anuais, além de orientações sobre distâncias de corpos hídricos, necessidade de monitoramento de nutrientes e metais, e uso de uma ferramenta de apoio à decisão para avaliar a viabilidade de cada projeto.

Na Inglaterra e no País de Gales, o lodo de ETA não possui categoria regulatória própria, estando sujeito às *E*nvironmental Permitting Regulations, que classifica o material como resíduo (EPR 2016). O relatório *Circular econmy – Water treatment sludges",* produzido pela *UK Water Industry Reseearch* (UKWIR, 2024) destaca que o material não está incluído no escopo da política de lodo de esgoto, evidenciando um enquadramento regulatório fragmentado que cria lacunas práticas e dificulta a adoção de estratégias de economia circular para esse resíduo, em situação análoga à observada no Brasil. A aplicação em solo pode ser realizada conforme as *Standard Rules britânica*, desde que o resíduo seja classificado como não perigoso e haja avaliação prévia pela *Environment Agency* (UKWIR, 2024).

No Canadá não há uma só lei nacional que compreenda o tema, porém é possível destacar que algumas de suas províncias possuem diretrizes e guias que buscam orientar os operadores de ETAs para melhor gerenciamento do lodo. Na província de Ontário, o *Design Guidelines for Drinking-Water Systems,* que foi elaborado pelo *Ontario Ministry of the Environment (MOE)*, órgão regulador ambiental da província, constitui um guia quanto a tecnologias estabelecidas em sistemas de tratamento de água (Ontário Ministry Of The Environment, 2016). O capítulo 12 desse guia dispõe exclusivamente sobre o gerenciamento dos resíduos provenientes desses sistemas, como o lodo e resíduos da lavagem de filtro, abordando formas de manuseio, tratamento e disposição ambientalmente adequada. Dentre as formas de disposição citadas aplicáveis a lodo de ETA no documento, aborda-se: (i) o lançamento desse resíduo em ETEs, desde que a instalação possua capacidade hidráulica suficiente para o tratamento; (ii) a aplicação em solo, desde que cumpra os requisitos necessários estabelecidos pela legislação da província; e (iii) a disposição em aterros sanitários, desde que tecnicamente justificada.

Outra província canadense que também apresenta diretrizes para o gerenciamento de sistemas de tratamento de água é a Colúmbia Britânica. O *Design Guidelines for Drinking Water Systems in British Columbia* possui uma série de instruções para melhor gerenciamento do lodo de ETA segundo a legislação local. Em geral, o guia preconiza que o gerenciamento desses resíduos deve envolver tópicos como o custo do tratamento desse resíduo, as suas características, os impactos dos processos de tratamento a serem empregados e os impactos quanto a aplicação e destinação desse resíduo. O documento traz a possibilidade de aplicação do lodo em solo para fins agrícolas desde que sejam analisados uma série de parâmetros, como a presença de cálcio e metais pesados em excesso, a verificação da área a ser aplicada e a avaliação do pH para as necessidades específicas da cultura a ser plantada, e os resultados sejam validados pelas autoridades competentes. Além disso, assim como na diretriz da província de Ontário, também considera como destinação adequada a disposição do resíduo em ETEs, desde que esteja de acordo com a capacidade de tratamento, assim como a disposição do lodo em aterro sanitário; ademais, o guia também recomenda procedimentos como a calcinação, visando recuperar materiais para uso em agregados na produção do concreto. (British Columbia, 2020)

Na Austrália, o estado de Queensland é o mais avançado na regulação do lodo de ETA, enquadrando o material como "recurso" na estrutura *End of Waste* (EOW) da *Waste Reduction and Recycling Act 2011*, uma regulamentação que atribuí códigos para resíduos que possam ser reaproveitados de diferentes maneiras. Para o lodo de ETA, os requisitos necessários para que o resíduo possa ser aplicado em solo devem ser: pH (entre 6,5 e 8,5), ser proveniente de processos de coagulação com sulfato de alumínio ou polímeros catiônicos ou aniônicos (sulfato de alumínio ou polímeros), estar abaixo dos limites de concentração de contaminantes e apresentar monitoramento trimestral. O material pode ser utilizado como condicionador ou corretivo de solo e como matéria-prima para compostagem, desde que não aplicado em solos de alta acidez (Queensland, 2011).

Para a França, existe o FD X33-020, documento elaborado pela Associação Francesa de Normalização (AFNOR) que compreende o Guia de Boas Práticas para valorização do lodo proveniente de estações de tratamento de água. O guia possui caráter técnico-normativo, com finalidade de fornecer informações, métodos e recomendações para os operadores de ETAs buscando a orientação para valorização do resíduo pela aplicação em solos e outras práticas. Dentre as recomendações indicadas, há ênfase na importância de se analisar a composição dos lodos e as características dos solos, buscando também apresentar procedimentos que considerem critérios de segurança, caracterização do solo e monitoramento. Dentre outras práticas sugeridas para gerenciamento desse resíduo está o despejo desse lodo em estações de tratamento de esgoto, incineração e recuperação energética e uso em compostagem (AFNOR, 2015).

Na África do Sul, o lodo de ETA é classificado como resíduo perigoso sob o *National Environmental Management: Waste Act (NEMWA, Act No. 59/2008)* e a *Waste Classification and Management Regulation* (WCMR, 2013), em razão da presença de metais provenientes dos coagulantes. O relatório da Water Research

Commission (WRC) – agência pública sul-africana de pesquisa e fomento em recursos hídricos – apresenta diretrizes específicas para o manejo desses resíduos, recomendando que o processo de gestão se inicie pela caracterização detalhada e pelo condicionamento preliminar, de forma a compreender as características físico-químicas do material e reduzir seu volume para melhorar a maneabilidade. As alternativas tecnológicas indicadas concentram-se em operações de desaguamento (mecânicas ou não), visando à remoção de água, redução de volume e facilitação do transporte, da disposição e de eventuais rotas de reúso. No que se refere à destinação, é recomendado como possíveis rotas: (i) a aplicação em solo (sem considerar áreas agrícolas) ou para uso agrícola, estando essa possibilidade sujeita a avaliação de parâmetros de aplicação, como monitoramento do solo e água subterrânea e limitação de metais no resíduo; (ii) a disposição em aterros sanitários, opção pouco recomendada no guia devido aos crescentes custos de disposição no país; e (iii) valorização desse resíduo, como a partir de oportunidades de reciclagem como o uso do material como agregado para construção civil e a recuperação de coagulantes químicos presentes.

Nos Estados Unidos, o relatório EPA 820-R-11-003 (USEPA, 2011) é a principal referência federal, com caráter técnico e não normativo. Esse documento é uma importante referência internacional, pois consolida dados de campo e práticas adotadas por grandes sistemas de abastecimento norte-americanos, oferecendo diretrizes técnicas para o gerenciamento sustentável do lodo de ETA. O relatório descreve etapas de espessamento, desaguamento, estabilização e disposição final, destacando parâmetros essenciais para o controle e monitoramento, como sólidos totais, sólidos voláteis, metais, pH e ferro residual, além de enfatizar a necessidade de caracterização contínua dos resíduos e da eficiência dos processos de remoção. Entretanto, o relatório possuir caráter estritamente técnico e não normativo, a USEPA não editou regulamentação federal específica para o resíduo, de modo que a responsabilidade de legislar sobre o tema recai integralmente sobre os estados, cada qual com liberdade para estabelecer seus próprios critérios, limites e exigências de monitoramento. Ainda assim, o documento serve como referência técnica e base para formulação de políticas públicas e regulamentações, podendo inspirar o contexto brasileiro.

Portanto, a fim de contextualizar o panorama legal do lodo de ETA em alguns países e regiões, foi realizada uma síntese das principais legislações, regulamentações e diretrizes técnicas adotadas (ver Quadro 1), buscando identificar para cada localidade o enquadramento jurídico do lodo, os órgãos reguladores envolvidos, a sua classificação, as possibilidades de destinação previstas nos marcos legais, além de requisitos para aplicação no solo e outras observações relevantes para cada país.

**Quadro 1 - Comparativo da legislação internacional sobre gerenciamento de lodo de ETA**

| País/Região | Principal Legislação | Órgão Regulador | Classificação do Lodo | Formas de Destinação |
|---|---|---|---|---|
| **Escócia** | *Waste Management Licensing (Scotland) Regs 2011*. | *SEPA* | Resíduo (exige licença *WML*) | Aterro; aplicação agrícola/ecológica |
| **Inglaterra e País de Gales** | *Environmental Permitting Regulations (*EPR 2016). | *Environment Agency* | Resíduo | Recuperação agrícola/ecológica (Standard Rules, se não perigoso) |
| **Austrália (Queensland)** | *Waste Reduction and Recycling Act 2011*. | *Dept. of Environment and Science* | Pode ser "recurso" (EOW) | Condicionador/corretivo de solo; composto orgânico |
| **França** | FD X33-020 (AFNOR, 2015) | AFNOR | Resíduo c/ potencial de valorização | Solo; ETEs; incineração; compostagem |
| **EUA** | EPA 820-R-11-003 (USEPA, 2011) + normas estaduais | USEPA + agências estaduais | Resíduo (sem classificação federal específica) | Espessamento, desaguamento, disposição conforme estado |
| **Canadá (Ontário)** | *Design Guidelines Drinking-Water Systems*, Cap. 12 (Ontário Ministry Of The Environment, 2016) | *Ontario MOE* | Resíduo | ETEs; solo ; aterro |
| **Canadá (B. Columbia)** | *Design Guidelines Drinking Water Systems BC*, Cap. 14 (2020) | *BC Ministry of Health* | Resíduo (hidróxidos e lime sludge) | Solo para fins agrícolas; ETEs; aterro; calcinação |
| **África do Sul** | *NEMWA (Act 59/2008*); *WCMR* (2013) | *Dept. of Environmental Affairs* | Pode ser resíduo perigoso | Solo/agrícola; aterro (pouco recomendado); reciclagem |

Fonte: Elaboração própria a partir de Gilmour *et al.* (2019), USEPA (2011), WRC (2019), UKWIR (2024), AFNOR (2015), Ontario Ministry of the Environment (2016), British Columbia (2020).

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETA

### 4.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

O lodo de ETA apresenta características físicas recorrentes que determinam seu manejo operacional. Sua coloração varia do acastanhado ao avermelhado quando coagulantes férricos são utilizados, e do bege ao marrom-claro quando predominam sais de alumínio (Ackah *et al*., 2018).

Quanto à composição, Tartari *et al*. (2018) destacam que que o lodo de ETA é composto por matéria orgânica natural e precipitados metálicos oriundos dos coagulantes, como $SiO_2$, $Al_2O_3$ e $Fe_2O_3$ sendo que granulometria é tipicamente dominada por frações finas. De maneira geral, a literatura indica que lodos de coagulantes férricos apresentam cerca de 75% de silte e 20% de argila e lodos de alumínio secos tendem a formar agregados grosseiros estáveis, dificultando a determinação granulométrica representativa (Ackah *et al*., 2018). Essa

granulometria fina confere elevada superfície específica e tendência à formação de suspensões altamente estáveis, dificultando processos de sedimentação sem o uso de coagulantes auxiliares (Tartari *et al*., 2011).

O teor de umidade do lodo fresco é muito elevado — valores de SST in natura situam-se tipicamente em torno de 4%, com umidade de 94–99% (Roque *et al*., 2020). Após desaguamento mecânico, os teores de sólidos podem alcançar 16–18% ou mais, dependendo do equipamento utilizado (Roque et al., 2020). A densidade de grãos situa-se entre 2,4 e 2,8 $g \cdot cm^{-3}$ para lodos formados a partir de coagulantes férricos ou por cal, e pode ser inferior a 2,0 $g \cdot cm^{-3}$ quando o teor orgânico é elevado ou quando formado por coagulantes a base de alumínio (Ackah *et al*., 2018). Lodos de alumínio, como as amostras analisadas por Barakwan, Trihadiningrum e Bagastyo (2019) da ETA de Surabaya, na Indonésia, apresentaram densidade próxima a 0,97 g/mL .

### 4.2.2. PROPRIEDADES QUÍMICAS

A composição química do lodo de ETA reflete diretamente os insumos aplicados no tratamento e as características da água bruta. Em ETAs que empregam coagulantes férricos, concentrações de ferro total superiores a 20.000 mg/L são comuns, podendo ultrapassar 50.000 mg/L em períodos de estiagem. Rossi *et al*. (2025) reportaram média de 28.867 mg/L de ferro total em lodo de uma ETA da Zona da Mata Mineira onde é utilizado coagulantes como o sulfato ferroso clorado, sendo a base de ferro. Em escala seca, lodos de cloreto férrico podem conter de 170.000 a 182.600 mg/kg de Fe, enquanto lodos alumínicos atingem 100.000 a 153.000 mg/kg de Al (Xu *et al*., 2020).

Os sólidos totais (ST) apresentam grande variabilidade: Rossi *et al*. (2025) reportaram ST de 40.036 a 109.164 mg/L; Silva *et al*. (2019) encontraram valores médios de 28.100 e 51.800 mg/L para diferentes ETAs. O pH tende a ser neutro a levemente ácido (5,0 a 8,4), com valor médio de 7,67 em ETA com coagulante a base de ferro (Rossi *et al*., 2025). A Demanda Química de Oxigênio (DQO) pode atingir valores muito elevados: Gervasoni (2014) registrou 55.347 mg/L em ETA que utiliza cloreto férrico; Rossi *et al*. (2025) encontraram média de 17.306 mg/L.

A relação SV/ST média reportada na literatura nacional é de aproximadamente 0,37, variando de 0,2 a 0,74, conforme o tipo de manancial e as condições operacionais. A matéria orgânica, derivada principalmente de substâncias húmicas e matéria orgânica natural coagulada, pode representar até 34,9% da massa seca em lodos de alumínio (Ackah *et al*., 2018). A relação DBO/DQO usualmente inferior a 0,2 indica predominância de matéria orgânica não biodegradável, demandando tratamento físico-químico em vez de biológico (Barakwan; Trihadiningrum; Bagastyo, 2019).

Dessa maneira, de forma a sistematizar as principais características físico-químicas observadas em estudos brasileiros , elaborou-se a Tabela 1, na qual são reunidos dados de diferentes estudos nacionais quanto ao tipo de amostragem, coagulante empregado, faixas de pH, DQO, DBO, sólidos totais e suspensos, sólidos voláteis e teores de ferro e alumínio, permitindo visualizar a variabilidade desses parâmetros entre ETAs e fornecendo um panorama integrado que subsidia a análise comparativa das propriedades do resíduo.

**Tabela 1 - Caracterização físico-química do lodo de ETA segundo a literatura nacional**

| Fonte | Amostragem | Coagulante | pH | DQO (mg/L) | DBO (mg/L) | ST (mg/L) | SST (mg/L) | STV (mg/L) | Fe Total (mg/L) | Al Total (mg/L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gervasoni (2014) | Lodo líquido | Alumínico | 6,8 | 14.697 | 413 | – | – | – | 125 | 1.190 |
| Burgos *et al.* (2015) | Lodo líquido | – | 6,8 | 4.779 | 88 | – | – | – | – | < 0,1 |
| Silva *et al.* (2019) | Lodo líquido | – | 6,4 | – | 13,2 | 28.100 | 24.851 | 5.800 | – | – |
| Rossi *et al.* (2025) | Lodo líquido | Férrico | 7,7 | 17.306 | – | 70.394 | – | 52.009 | 28.867 | – |

Fonte: Elaboração própria a partir de Gervasoni (2014), Burgos et al. (2015), Silva et al. (2019) e Rossi et al. (2025).

### 4.2.3. PROPRIEDADES MINERALÓGICAS

A composição mineralógica do lodo de ETA é determinada principalmente pelo tipo de coagulante e pelas características geológicas do manancial. Análises por difratometria de raios X (DRX) revelam a presença de fases cristalinas como calcita, quartzo e feldspatos, além de grande fração amorfa constituída por hidróxidos de alumínio e ferro (Ackah *et al*., 2018; Xu *et al.*, 2020).

Lodos de cal apresentam predominância de calcita, explicando seu caráter alcalino; em lodos alumínicos, predominam quartzo e fases amorfas de $Al(OH)_3$, frequentemente associadas a matéria orgânica. Os teores de $Al_2O_3$ variam de 20,96% a 34,77% e os de $Fe_2O_3$ de 5,18% a 12,9% em base seca, conforme Castro-Jiménez *et al.* (2024). A elevada área superficial específica (podendo superar 100 $m^2/g$, determinada pelo método BET) confere aos lodos alta capacidade de adsorção de fósforo, metais pesados e micropoluentes (Xu *et al*., 2020).

### 4.2.4. ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS E RISCOS À SAÚDE

A caracterização microbiológica do lodo de ETA é fundamental para compreender os riscos sanitários associados ao seu manejo e disposição. Estudos nacionais evidenciam que o lodo proveniente de decantadores apresenta concentrações elevadas de microrganismos indicadores de contaminação fecal, refletindo tanto a qualidade da água bruta quanto o acúmulo de sólidos e matéria orgânica nos decantadores.

Burgos *et al.* (2015) identificaram, no lodo bruto da ETA Tibagi, $14\times10^6$ NMP/100 mL de coliformes totais, $4{,}8\times10^5$ NMP/100 mL de *E. coli* e $4{,}6\times10^4$ NMP/100 mL de Enterococcus. Na ETA Cafezal, os valores de coliformes totais atingiram $24\times10^6$ NMP/100 mL. Rossi *et al.* (2025) reportaram *E. coli* de $8{,}4\times10^3$ a $2{,}53\times10^6$ UFC/100 mL, além de Esporos de Bactérias Aeróbias (EBA) entre $1{,}53\times10^5$ e $1{,}60\times10^7$ UFC/100 mL.

Nesse propósito, assim como para a caracterização físico-química, foi elaborada de forma análoga a Tabela 2, que sintetiza a caracterização microbiológica do lodo de ETA segundo a literatura nacional, reunindo para diferentes estudos os tipos de coagulante empregados e as concentrações de coliformes totais e fecais, *E. coli*, esporos de bactérias aeróbias (EBA) e ovos de helmintos. A tabela permite evidenciar a magnitude da carga microbiana concentrada no lodo em comparação à água bruta, bem como comparar faixas de valores entre ETAs e cenários operacionais distintos, fornecendo base quantitativa para avaliar os riscos sanitários associados ao manejo, ao desaguamento e às alternativas de disposição e reúso desse resíduo.

**Tabela 2 - Caracterização microbiológica do lodo de ETA segundo a literatura nacional**

| Fonte | Coagulante | Colif. Totais (NMP/100mL) | Colif. Fecais (UFC/100mL) | *E. coli* (NMP/100mL) | EBA (UFC/100mL) | Ovos helmintos (ovo/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gervasoni (2014) | Alumínico | – | $5{,}0\times10^{7}$ | – | – | 66 |
| Burgos *et al.* (2015) ETA Tibagi | – | $14\times10^{6}$ | – | $4{,}8\times10^{5}$ | – | – |
| Burgos *et al.* (2015) ETA Cafezal | – | $24\times10^{6}$ | – | $2{,}4\times10^{2}$ | – | – |
| Rossi *et al.* (2025) | Férrico | – | – | $8{,}4\times10^{3}$–$2{,}5\times10^{6}$ | $1{,}5\times10^{5}$–$1{,}6\times10^{7}$ | – |

Fonte: Elaboração própria a partir de Gervasoni (2014), Burgos *et al.* (2015) e Rossi *et al.* (2025).

Burgos *et al.* (2015) verificaram que o desaguamento físico proporciona reduções de 90 a 100% nos indicadores fecais, embora os drenados ainda apresentem microrganismos em concentrações relevantes. Diretrizes internacionais (WRC, 2019; British Columbia, 2020) recomendam que o lodo destinado a reúso em áreas sensíveis passe por avaliação de risco microbiológico e estabilização prévia, por exemplo, por compostagem ou tratamento com cal.

### 4.2.5. POTENCIAIS RISCOS AMBIENTAIS

A disposição inadequada do lodo de ETA impõe riscos ambientais significativos. O lançamento direto em corpos hídricos acarreta assoreamento, redução do oxigênio dissolvido, desequilíbrio ecológico e recontaminação de mananciais. A presença de metais pesados, ainda que em muitos casos abaixo de limiares de periculosidade, exige monitoramento contínuo, sobretudo quando o lodo provém de mananciais impactados por atividades industriais ou agrícolas. Metais como arsênio, bário, cobre, manganês, níquel, zinco e cobalto foram identificados em lodos de ETAs norte-americanas (Ackah *et al.*, 2018). Além disso, compostos orgânicos adsorvidos na matriz sólida podem ser remobilizados em condições ambientais específicas, como variações de pH e potencial redox.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. DESAFIOS NA GESTÃO DO LODO DE ETA

A gestão do lodo de ETA no Brasil enfrenta desafios técnicos, institucionais e econômicos que dificultam a adoção de práticas sustentáveis e uniformes. A ausência de parâmetros nacionais para caracterização físico-química e microbiológica resulta em análises heterogêneas e incomparáveis entre ETAs. A disposição inadequada em corpos hídricos ainda é recorrente: segundo dados do IBGE (2017), cerca de 1.030 municípios brasileiros descartam lodo sem tratamento prévio, impondo severos impactos às bacias hidrográficas (Rossi *et al.*, 2025).

Do ponto de vista operacional, as tecnologias de desaguamento e secagem demandam infraestrutura complementar e sobrecarga energética, fato que torna mais complexa a operação, principalmente em municípios de pequeno e médio porte. A disposição em aterros sanitários, prática predominante nas ETAs que realizam

algum tratamento do resíduo, representa custo elevado e contradiz os princípios da PNRS. Em contrapartida, opções como a utilização em indústrias ceramistas e cimenteiras, a aplicação agrícola controlada e a recuperação de coagulantes têm sido demonstradas como alternativas ambientalmente seguras e economicamente atrativas em múltiplas pesquisas (Sousa *et al*., 2022).

O processo de licenciamento ambiental, embora represente uma janela de oportunidade para o avanço regulatório, como demonstrado pela IN IAT nº 37/2025 (Paraná), pela COPAM nº 245/2022 (Minas Gerais) e pelas exigências da CETESB (São Paulo), permanece dependente da interpretação dos órgãos ambientais estaduais, gerando insegurança jurídica e desigualdade de tratamento entre operadores.

## 5.2. LACUNAS NA LEGISLAÇÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

A principal lacuna no arcabouço legal brasileiro é a ausência de uma norma federal específica para o lodo de ETA, que estabeleça critérios técnicos claros de caracterização, classificação, monitoramento e formas de destinação. A extrapolação da CONAMA nº 498/2020, elaborada para biossólidos oriundos de lodo de esgoto, é insuficiente para abranger as particularidades químicas do lodo de ETA, como a predominância de hidróxidos metálicos e a menor fração de matéria orgânica biodegradável.

A Resolução CONSEMA-RS nº 461/2022 oferece um exemplo técnico e jurídico pioneiro que pode servir de base para uma diretriz nacional. A elaboração de uma norma federal, sob coordenação do Ministério do Meio Ambiente e da ANA, com participação de órgãos estaduais, universidades e companhias de saneamento, é indicada como passo essencial para consolidar critérios nacionais de gestão e reaproveitamento. Em âmbito internacional, países como Austrália (Queensland) e Escócia têm desenvolvido *frameworks* regulatórios que permitem a valorização do lodo como recurso, alinhados à lógica da economia circular, constituindo referências para a formulação de políticas públicas no Brasil.

## 6. CONCLUSÃO

O lodo de ETA é um resíduo de geração inevitável, crescente e com características físico-químicas, microbiológicas e mineralógicas que exigem gestão técnica cuidadosa. A composição do material é fortemente determinada pelo tipo de coagulante, seja proveniente de sais férricos ou de alumínio, pela qualidade da água bruta e pelo tempo de armazenamento, resultando em variabilidade substancial entre ETAs e entre lotes gerados pela mesma instalação em diferentes épocas.

A revisão evidenciou que o Brasil ainda não dispõe de regulamentação federal específica para o gerenciamento do lodo de ETA, apoiando-se em instrumentos legais genéricos que geram insegurança jurídica e heterogeneidade nos processos de licenciamento e destinação. Em contrapartida, experiências internacionais e iniciativas estaduais, como a Resolução CONSEMA-RS nº 461/2022, demonstram a viabilidade de normas específicas voltadas à caracterização, monitoramento e reaproveitamento do resíduo.

Recomenda-se, como agenda prioritária, a elaboração de uma norma técnica federal para o lodo de ETA, o fortalecimento das exigências de licenciamento ambiental vinculadas ao LETA, o incentivo à pesquisa aplicada em tecnologias de reaproveitamento, e o estabelecimento de protocolos nacionais de caracterização e monitoramento que possibilitem a comparação de dados entre ETAs e a formulação de políticas públicas baseadas em evidências.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Regulatório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais – ARSAE-MG, à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACKAH, L. A.; GURU, R.; PEIRAVI, M.; MOHANTY, M.; MA, X.; KUMAR, S.; LIU, J. Characterization of Southern Illinois Water Treatment Residues for Sustainable Applications. *Sustainability*, v. 10, n. 5, p. 1374, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/su10051374.

2. ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION – AFNOR. Guide de bonnes pratiques pour l'élimination et la valorisation des boues d'eau potable (FD X33-020). Boues d'eau potable – Bonnes pratiques. Saint-Denis: AFNOR, 2015.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

4. BARAKWAN, R. A.; TRIHADININGRUM, Y.; BAGASTYO, A. Y. Characterization of Alum Sludge from Surabaya Water Treatment Plant, Indonesia. Journal of Ecological Engineering, v. 20, n. 5, p. 7–13, 2019.

5. BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

6. BRITISH COLUMBIA. *Design Guidelines for Drinking Water Systems in British Columbia*. British Columbia Ministry of Health, 2020. Disponível em: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/how-drinking-water-is-protected-in-bc/dwog_part_b_-_17_design_guidelines_for_drinking_water.pdf

7. BURGOS, T. N. et al. Caracterização microbiológica e físico-química do lodo de decantadores das estações de tratamento de água após desaguamento em leito de drenagem com manta geotêxtil. *Revista Ciências da Saúde*, v. 17, n. 1, p. 17-24, jan./jun. 2015.

8. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Norma Técnica P4.230*: Lodos de sistemas de tratamento biológico de águas residuárias – Aplicação no solo – Critérios para projeto e operação. São Paulo: CETESB, 2021.

9. CONAMA. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Uso agrícola de lodos de esgoto e produtos derivados. DOU: Brasília, DF, 20 ago. 2020.

10. CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 245, de 24 de março de 2022. Estabelece prazos para a regularização ambiental de sistemas de tratamento de água e dá outras providências. Diário do Executivo "Minas Gerais", Belo Horizonte, 14 abr. 2022.

11. RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). *Resolução nº 461, de 19 de maio de 2022*. Define critérios e procedimentos para o uso de lodos gerados em estações de

tratamento de água (LETAs) e seus produtos derivados em solos, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, RS, 15 jun. 2022.

12. GILMOUR, D.; JORAT, E.; MINTO, A.; TIERNEY, I.; AITKENHEAD, M.; COULL, M.; HOUGH, R. Applying drinking water treatment sludges to land: opportunities and implications. Aberdeen: Scotland's Centre of Expertise for Waters (CREW), 2022. 50 p. CRW2019_01. ISBN 978-0-902701-05-2.

13. GERVASONI, R. *Caracterização e avaliação do potencial de destinação do lodo de estações de tratamento de água do Estado do Paraná.* 2014. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

14. INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). *Instrução Normativa nº 37, de 28 de abril de 2025*. Estabelece definições, critérios, diretrizes e procedimentos para o licenciamento ambiental de Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES) e Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) no âmbito do Estado do Paraná. Diário Oficial do Estado do Paraná: Curitiba, PR, 28 abr. 2025.

15. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2017.

16. ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. *Design Guidelines for Drinking-Water Systems*. Ontario Ministry of the Environment and Climate Change, 2016.

17. QUEENSLAND. Waste Reduction and Recycling Act 2011. Brisbane: Queensland Government, 2011.

18. ROQUE, A.; MONTALVAN, E. L. T.; BOSCOV, M. E. G. Influência da adição de lodo de uma ETA na resistência de uma areia argilosa laterítica. Anais *COBRAMSEG*, 2020.

19. ROSSI, L. C.; PEREIRA, L. V.; SÁ, M. C. de; CORRÊA, C. P.; PEREIRA, R. de O. Caracterização do lodo de decantador de uma ETA localizada na Zona da Mata Mineira. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL* – ABES, 33., 2025, Brasília. Anais [...]. Brasília: ABES, 2025.

20. SCOTLAND. *Waste Management Licensing (Scotland) Regulations 2011*. Scottish Statutory Instruments No. 228. Edinburgh: The Scottish Government, 2011.

21. SILVA, I. S.; GARCIA, H. L.; FREITAS, J. A.; COSTA, S. S. L.; MONTEIRO, A. S. C.; GARCIA, C. A. B.; SILVA, J. M. Caracterização físico-química de lodo de estações de tratamento de água – ETA em Aracaju. In: *ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE*, 12., 2019, Aracaju. Anais [...]. Aracaju: [s. n.], 2019.

22. SOUSA, S. S. O.; ALBUQUERQUE, M. G.; TAVARES, R. G.; EL-DEIR, S. G. Políticas públicas relativas ao lodo de estação de tratamento de água. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, Ciudad de México, v. 15, n. 2, p. 548–558, 6 ago. 2022. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.78117.

23. SOUTH AFRICA. Waste Classification and Management Regulations, 2013. Government Notice R634 of 2013. Pretoria: Government Gazette, 23 ago. 2013. Publicado nos termos do National Environmental Management: Waste Act, 2008 (Act No. 59 of 2008).

24. SOUTH AFRICA. National Environmental Management: Waste Act 59 of 2008. Pretoria: Government Gazette, 2009.

25. TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu-PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. *Caderno de Engenharia Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 17-28, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000300006.

26. UK WATER INDUSTRY RESEARCH (UKWIR). *Circular Economy – Water Treatment Sludges*. London: UKWIR, 2024.

27. UNITED KINGDOM. Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016. Statutory Instrument No. 1154. London: The National Archives, 2016.

28. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Drinking Water Treatment Plant Residuals Management: Technical Report – Summary of Residuals Generation, Treatment, and Disposal at Large Community Water Systems*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 2011. (EPA 820-R-11-003).

29. WATER RESEARCH COMMISSION (WRC). Guidelines and Good Practices for Water Treatment Residuals Handling. Pretoria: WRC, 2019.

30. XU, D.; LEE, L. Y.; LIM, F. Y.; LYU, Z.; ZHU, H.; ONG, S. L.; HU, J. Water treatment residual: a critical review of its applications on pollutant removal from stormwater runoff and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 2020, 109649. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109649.