

Indicadores de desempenho como instrumento de gestão de lodo de estações de tratamento de esgoto

Performance indicators as an instrument for the management of sludge from sewage treatment plants


- **Data de entrada:** 13/03/2023
- **Data de aprovação:** 26/04/2023

Caroline Gandolphi^{1*} | Cali Laguna Achon¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.021>

ORCID ID

Gandolphi C  <https://orcid.org/0009-0003-7747-2508>

Achon CL  <https://orcid.org/0000-0001-5819-8089>

Resumo

O lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETE), se manejado de forma integrada ao sistema, é um resíduo sólido com elevado potencial de reaproveitamento. Os indicadores de desempenho (ID) são importantes instrumentos para avaliar a gestão desse resíduo, pois possibilitam averiguar o processo de melhoria do tratamento ao longo do tempo e comparar prestadores. Esta pesquisa tem a finalidade de analisar o uso de ID como instrumento de gestão do lodo de esgoto, por meio do levantamento de indicadores disponíveis em literatura e da elaboração de um conjunto de ID pertinentes ao tema. Foi realizada a aplicação desses indicadores em ETE selecionadas e foi constatado que um número elevado de dados, referentes ao lodo, não são mensurados. Considerando o diagnóstico obtido, foi proposto um conjunto de indicadores estratégicos, aplicáveis a partir de uma quantidade reduzida de informações, que abordam os principais aspectos referentes ao manejo do lodo.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Indicadores de desempenho. Esgotamento sanitário. Gestão.

Abstract

The sludge generated in the sewage treatment stations (ETE) is a solid sewage residue with high potential for reuse, if managed in an integrated way to the system. The performance indicators (PI) are important tool to evaluate the management of this waste, since they allow to investigate the improvement process of the treatment over time and compare providers. This research aims to analyze the use of PI as a sewage sludge management tool, with a survey of indicators available in the literature and the elaboration of a set of PI pertinent to the theme. These indicators were applied in selected ETEs, and it showed that a large number of data referring to the sludge are not measured. Considering the diagnosis obtained, a set of strategic indicators was proposed, applicable from a reduced amount of information, which address the main aspects related to sludge management.

Keywords: Sewage sludge. Performance indicators. Sanitary sewage. Management.

¹ Universidade Federal de São Carlos – São Carlos – São Paulo – Brasil.

* **Autora correspondente:** carolgandolphi@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O sistema de esgotamento sanitário (SES) é composto pelas atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até o seu lançamento final no meio ambiente ou sua recuperação para reúso (Brasil, 2007).

É na etapa de tratamento que ocorre a redução do potencial poluidor do esgoto bruto para posterior destinação final, que pode ser o reúso ou o descarte dos efluentes, de acordo com o sistema de tratamento utilizado e os parâmetros finais dos resíduos.

A eficiência do SES depende da perspectiva de sua operação de forma integrada e holística, abrangendo todas as etapas que o compõe e focando cada vez mais na recuperação de água, energia e nutrientes. A necessidade da gestão integrada do sistema é defendida por diversos autores, que destacam como o desempenho de todo o sistema de esgoto pode impactar significativamente o desempenho das estações de tratamento de esgoto (ETEs) (Collivignarelli *et al.*, 2021).

Todas as etapas constituintes do tratamento do esgoto sanitário contribuem com a geração de resíduos, que podem ser sólidos ou gasosos, além do efluente líquido resultante do tratamento. Esses resíduos precisam ser removidos para garantir a eficiência dos sistemas e então destinados, tratados e reutilizados ou dispostos adequadamente, a fim de evitar impactos ambientais.

Os resíduos sólidos gerados nas ETEs – os rejeitos do tratamento preliminar e o lodo gerado nas demais etapas – são uma parcela comumente negligenciada, provenientes das diversas etapas do tratamento (Achon; Cordeiro, 2016). O lodo corresponde a cerca de 3% do volume de esgoto tratado, dependendo da tecnologia e forma de remoção, e se apresenta em consistência semissólida, constituído de aproximadamente

98% de umidade. Sua fração sólida é composta por concentrações de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e metais pesados (Silva; Achon, 2019).

Por se tratar de resíduo sólido, o lodo de esgoto deve atender ao disposto na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída por meio da Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que determina que os resíduos devem receber destinação ambientalmente adequada, priorizando sua reutilização, e apenas os rejeitos devem ser encaminhados para disposição final em aterros (Brasil, 2010). Para a obtenção de um material próprio para reúso, é necessário que o resíduo passe por tratamento. O processamento do lodo gerado na ETE (LETE) objetiva a redução do seu percentual de umidade e sua estabilização, reduzindo assim o volume de lodo e facilitando seu manuseio e transporte, assim como a preparação do resíduo para reutilização (Silva; Achon, 2019).

Diante da necessidade de sistemas de tratamento de esgoto que atendam às prescrições da legislação pertinente e englobem o processamento do LETE como parte integrante do sistema de esgotamento sanitário, surge a necessidade de avaliar a eficiência da gestão do lodo e a real situação desses sistemas, objetivando melhorias contínuas, conforme propõe a norma NBR ISO 24511 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012).

A norma NBR ISO 24511 (ABNT, 2012) foi elaborada com o objetivo de fornecer aos prestadores dos serviços de saneamento diretrizes para avaliar e aprimorar os serviços prestados, assim como sua gestão. A norma propõe uma metodologia para avaliação e proposição de melhorias dos sistemas de esgotamento sanitário, recomendando o uso de indicadores de desempenho como ferramenta essencial.

Os indicadores de desempenho (ID) são um importante instrumento de gestão, que pode ser usado para avaliação dos serviços de esgoto prestados. Com o uso de ID, é possível reduzir a assimetria de

informações, incrementar transparência às ações dos prestadores e avaliar objetiva e sistematicamente a prestação dos serviços, considerando o processo de melhoria ao longo do tempo e visando comparar prestadores e identificar as melhores práticas (Barros, 2013).

De acordo com a NBR ISO 24511 (ABNT, 2012), os indicadores de desempenho são tipicamente apresentados como relações entre variáveis, que podem ser proporcionais – expressas em porcentagem (%) – ou não proporcionais – manifestadas por meio de variáveis com unidades distintas ($\$/m^3$). Essas relações estabelecidas pelos ID se mostram competentes para comparar diferentes parâmetros dos sistemas de esgoto, podendo elucidar possíveis discrepâncias ou boas práticas desenvolvidas, conforme pesquisa realizada por Dorsa, Pereira e Magalhães Filho (2019).

Dessa forma, a necessidade de aprimorar os processos de manejo do lodo de esgoto pode ser suprida por meio do uso de indicadores de desempenho como uma ferramenta de gestão em concordância com as recomendações normativas.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é analisar o uso de indicadores de desempenho como instrumento de gestão do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto, por meio da avaliação da aplicação de um conjunto de indicadores de desempenho em ETEs no estado de São Paulo.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida por meio de quatro etapas, tendo início com pesquisa bibliográfica para levantamento de indicadores de desempenho disponíveis em literatura, seguindo com a definição da área de abrangência da pesquisa para posterior coleta de dados e aplicação dos indicadores, e concluindo com a análise da aplicabilidade dos indicadores de desempenho.

3.1 Etapa 1 – Pesquisa bibliográfica e levantamento de indicadores de desempenho aplicáveis ao lodo de esgoto

Inicialmente, foi realizada pesquisa bibliográfica para embasamento teórico a respeito do uso de indicadores de desempenho como instrumento de gestão e do contexto da gestão do lodo de esgoto no Brasil. Posteriormente, foram selecionadas, a partir de publicações nacionais e internacionais, fontes de indicadores de desempenho aplicáveis para a gestão dos serviços de esgoto.

O levantamento dos indicadores de desempenho aplicáveis ao manejo do lodo de esgoto constituiu na busca em fontes de acesso público pelo tema e na busca de referências de publicações científicas relevantes, resultando na identificação de fontes nacionais e internacionais com publicações significativas contendo seleções de indicadores de desempenho.

Foram identificadas sete fontes de indicadores de desempenho, sendo quatro entidades internacionais e três nacionais. As fontes de indicadores de desempenho internacionais foram a International Water Association (IWA) (Matos *et al.*, 2004), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal (Quadros *et al.*, 2010; Rosa *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2012; Silva; Matos; Rosa, 2016), a Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (Ersar) de Portugal (2021) e a Associação de Entes Reguladores de Água e Saneamento das Américas (ADERASA) (Sunass, 2021), identificadas respectivamente como FI1, FI2, FI3 e FI4. As fontes nacionais foram o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (2020), a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (Abes) (2022) e a Associação Brasileira de Agências de Regulação (Abar) (Galvão Júnior; Silva, 2006), representadas respectivamente pelos identificadores FN1, FN2 e FN3.

Essas entidades desenvolveram conjuntos de indicadores de desempenho inerentes aos serviços de

esgotamento sanitário, direcionados para diferentes objetivos e prioridades. Para o desenvolvimento desta pesquisa, esses conjuntos foram tabelados, e, a partir dessa estruturação, foram identificados os indicadores que contemplam a gestão do lodo gerado no tratamento.

Os indicadores aplicáveis para a gestão do lodo foram analisados considerando suas fontes e o parâmetro abordado, sendo reconhecidas as semelhanças entre eles e o total de parâmetros abordados. Após essa análise, os indicadores foram compilados, adaptados e complementados para a obtenção de um conjunto de ID que possa ser aplicado às ETEs selecionadas, considerando a variação de porte e de tecnologias de tratamento empregadas nelas.

3.2 Etapa 2 – Definição da área de abrangência da pesquisa

Em paralelo à elaboração do conjunto de indicadores de desempenho, foi determinada a área de abrangência desta pesquisa, na qual se localizam as ETEs que integraram a etapa de aplicação.

A área para aplicação dos indicadores de desempenho foi delimitada pela área da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 15 – Turvo/ Grande. Nesse contexto, foram definidos dez municípios com população acima de dez mil habitantes e com faixas populacionais variadas, de modo que a aplicação dos ID incluísse estações de tratamento de esgoto de diferentes portes.

3.3 Etapa 3 – Coleta de dados nas ETEs selecionadas e aplicação dos ID

Com base no conjunto de ID definido, foram identificados os dados requeridos para sua aplicação, isto é, as variáveis de entrada necessárias para cada indicador. Como ferramenta para obtenção dos dados, foi elaborado um formulário de coleta de dados, aplicado aos gestores das estações de tratamento de esgoto selecionadas para esta pesquisa.

Após a obtenção dos dados, estes foram organizados e compilados em planilhas digitais, possibilitando a aplicação dos indicadores e a comparação de informações, como ferramenta de avaliação da gestão do lodo de esgoto.

3.4 Etapa 4 – Análise da aplicabilidade dos indicadores de desempenho

A partir dos resultados obtidos pela aplicação dos indicadores, foi avaliada a funcionalidade do conjunto de indicadores elaborado para aplicação em ETEs brasileiras, considerando a disponibilidade de dados por parte dos administradores, a compatibilidade entre unidades de medida e a concordância entre as informações exigidas pelos indicadores e os métodos de tratamento aplicados.

Desse modo, foi possível avaliar a funcionalidade da aplicação do conjunto de indicadores elaborado como ferramenta para gestão do lodo de esgoto, assim como avaliar e comparar a gestão do lodo entre as ETEs pesquisadas, evidenciando as diferenças entre os processos e práticas adotadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Seleção dos indicadores de desempenho aplicáveis para gestão do lodo de esgoto

Dentre todas as fontes pesquisadas, foram identificados um total de 510 indicadores de desempenho relativos aos serviços de esgoto.

No que se refere aos indicadores de desempenho relativos à gestão do lodo gerado em ETEs, verificou-se que estes foram abordados apenas pelas fontes internacionais. Entre todos os indicadores nacionais pesquisados, não foram identificados indicadores que contemplem a gestão do lodo de esgoto, conforme Figura 1.

Foi levantado um total de 28 indicadores direcionados para a gestão do lodo de esgoto, todos em âmbito internacional, o que representa apenas 5% do total de indicadores pesquisados.

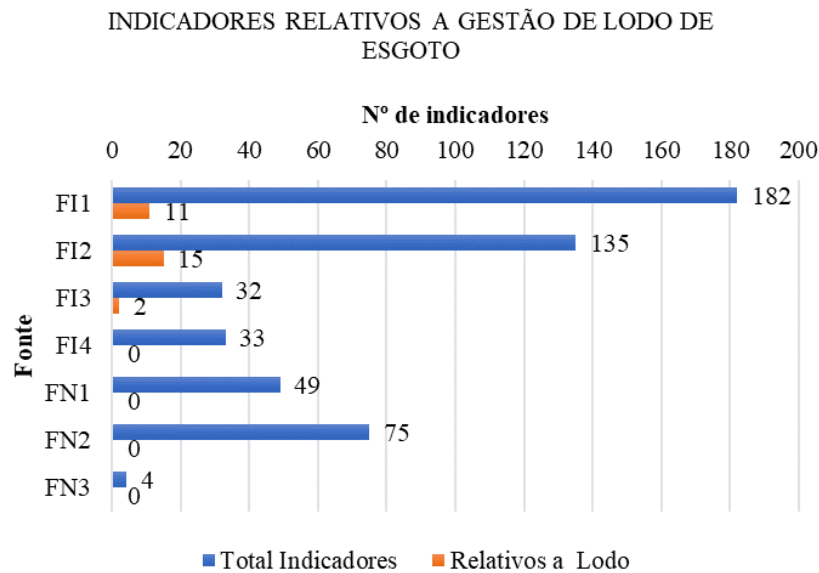


Figura 1 – Indicadores de desempenho relativos à gestão de lodo de esgoto.

Vale destacar que no âmbito nacional não foi identificado, nas fontes consultadas, nenhum indicador relacionado à gestão de lodo de ETE. Os principais aspectos abordados entre esses indicadores são a quantidade produzida, as análises da qualidade do lodo, os custos envolvidos e a sua disposição final.

Objetivando a aplicação dos indicadores de desempenho levantados, estes foram agrupados de forma que os indicadores com as mesmas variáveis e o mesmo método de cálculo fossem incorporados. Eles também foram tabulados e ordenados de acordo com o parâmetro avaliado, possibilitando a identificação de características abordadas de forma imprecisa e a proposição de novos indicadores complementares.

A partir do ID Etl01, foi constatado que não há, entre os indicadores levantados, algum que aborde de forma individual as etapas de tratamento e desaguamento às quais o lodo de esgoto é submetido. Sendo assim, foram propostos os novos ID Etl02, Etl03, Etl04, Etl05 e Etl06 para que seja possível observar o desempenho dos sistemas em relação a esses parâmetros.

Alguns indicadores selecionados, apesar de estarem categorizados por suas fontes como indicadores relacionados ao lodo de esgoto, não se baseiam em variáveis relativas a parâmetros do lodo, como: Etl09, Etl10, Edl11 e Edl12, que estão ligados mais diretamente à eficiência do sistema, e Ers01, Ers02, Ers03 e Ers04, que se direcionam à remoção de sedimentos. Apesar da relação extrínseca entre esses indicadores e o lodo de esgoto, os resultados obtidos com eles são de extrema relevância para a comparação de resultados entre diferentes operadores.

A partir dos indicadores de desempenho existentes relacionados aos sedimentos gerados no processo de tratamento de esgoto, foram propostos os ID Ers05 e Ers06, que relacionam esses sedimentos ao lodo de esgoto. Também foram incluídos os ID Edl09, Edl10 e Edl11, que são desdobramentos do indicador original wtBP09. Apesar de não serem tratados por Silva, Matos e Rosa (2016) como indicadores independentes, é válido incluí-los na relação de ID a serem aplicados, pois estão diretamente ligados à destinação final do lodo de esgoto.

Determinados indicadores dentre o total levantado não abordavam com clareza a unidade ou o estado do lodo a ser considerado como variável, como os ID Egl01 e Edl01. Nos indicadores nos quais esse cenário foi verificado, foram definidos os parâmetros em aberto com base no contexto da variável necessária e na compatibilidade com os demais indicadores.

Também foi necessária a adaptação de unidades nos indicadores Ecl01 e Ecl02, que, por possuírem origem internacional e estarem relacionados à análise de custos, trazem unidades em euros. Para adequação aos dados disponíveis nas ETEs bra-

sileiras, a unidade foi modificada para reais, para fim de aplicação desses indicadores.

Para efeito de compatibilização dos dados utilizados e considerando as diferenças de termos usados por cada uma das fontes, foi considerado como lodo bruto aquele imediatamente após a remoção do sistema de tratamento de esgoto, e lodo processado aquele gerado após ser submetido a todas as etapas do tratamento disponíveis nas ETEs.

Dessa forma, foi obtido um total de 36 indicadores de desempenho aplicáveis à gestão do lodo de esgoto, conforme exibido na Tabela 1.

Tabela 1 – Conjunto de indicadores de desempenho aplicáveis à gestão do lodo de esgoto.

| Geração de lodo | |
|---|--|
| Cod. ID | Produção de lodo em ETE |
| Egl01 | Relação entre a massa de lodo processado gerado e a população atendida pelo sistema |
| Egl02 | Relação entre a massa de lodo processado gerado e o volume de esgoto tratado |
| Egl03 | Relação entre a massa de lodo processado gerado e a massa de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) removida |
| Egl04 | Relação entre a massa de lodo processado gerado e a massa de Demanda Química de Oxigênio (DQO) removida |
| Análises de lodo | |
| Egl05 | Relação entre o nº de análises realizadas no lodo e nº de análises requeridas pela legislação no período de referência |
| Monitoramento da qualidade da água/lamas | |
| Egl06 | Relação entre a quantidade de unid. operacionais com monitoram. da qualidade do lodo gerado e o total de unid. operacionais da ETE |
| Tratamento do lodo | |
| Encaminhamento adequado de lamas do tratamento | |
| Etl01 | Porcentagem de lodo gerado em fossas sépticas coletivas e na ETE encaminhado para tratamento em ETE de outra unidade gestora (bruto) ou entregue a operador licenciado (processado). |
| Etl02 | Porcentagem lodo bruto gerado na ETE encam. p/ tratamento na própria unidade |
| Etl03 | Porcentagem lodo bruto gerado na ETE encam. p/ desaguamento |
| Etl04 | Porcentagem lodo bruto gerado na ETE encam. p/ secagem |
| Etl05 | Porcentagem lodo bruto gerado na ETE encam. p/ outros processos de tratamento |
| Etl06 | Relação entre o consumo de energia elétrica no manejo do lodo e a massa de lodo processado gerado na ETE |
| Sólidos secos de lodo | |
| Etl07 | Concentração de sólidos secos do lodo processado |
| Conformidade da qualidade do lodo para uso na agricultura | |
| Etl08 | Relação entre a somatória de testes em conformidade com o parâmetro analisado e o total de testes realizados |
| Eficiência na remoção de DBO/DQO | |
| Etl09 | Relação entre a massa de DBO removida e o volume de esgoto tratado durante os dias com dados referentes a remoção de DBO |
| Etl10 | Relação entre a massa de DQO removida e o volume de esgoto tratado durante os dias com dados referentes a remoção de DQO |
| Destino final do lodo | |
| Valorização de lodo em ETE | |
| Edl01 | Relação entre a massa de lodo processado destinado ao uso benéfico e a massa total de lodo processado |

continua...

Tabela 1 - Continuação...

| Descarte de lodo | |
|--|--|
| Edl02 | Relação entre a massa de lodo processado disposto adequadamente e a massa total de saída de lodo processado |
| Edl03 | Relação entre a massa de lodo processado disposto em aterro ou incinerado e a massa total de lodo processado |
| Edl04 | Relação entre a massa de lodo processado disposto em aterro e a massa total de lodo processado |
| Edl05 | Relação entre a massa de lodo processado incinerado e a massa total de lodo processado |
| Edl06 | Relação entre a massa de lodo processado com outro destino final e a massa total de lodo processado |
| Saída de lodo | |
| Edl07 | Relação entre a massa de saída de lodo e a somatória do lodo processado gerado, lodo processado acumulado no dia 1 do período de avaliação e o lodo processado de outras instalações |
| Recuperação de Fósforo (P) | |
| Edl08 | Relação entre a massa de fósforo total recuperada e a massa de fósforo presente no esgoto bruto |
| Edl09 | Relação entre a massa de lodo usada na agricultura e a massa de fósforo presente no esgoto bruto |
| Edl10 | Relação entre a massa de água reutilizada para irrigação e a massa de fósforo presente no esgoto bruto |
| Edl11 | Relação entre a massa de fósforo presente no lodo recuperado e a massa de fósforo presente no esgoto bruto |
| Edl12 | Relação entre a massa de fósforo descartado em corpos d'água e a massa de fósforo presente no esgoto bruto |
| Custos com manejo do lodo | |
| Custos de processamento e descarte de lodo | |
| Ecl01 | Relação entre os custos de processamento e descarte de lodo e o volume de efluentes tratados |
| Ecl02 | Relação entre os custos de processamento e descarte de lodo e o custo de funcionamento da ETE |
| Relativos a outros resíduos sólidos gerados no SES | |
| Remoção de sedimentos | |
| Ers01 | Relação entre a massa de sedimentos removidos da rede e o comprimento da rede |
| Ers02 | Relação entre a massa de sedimentos removidos de estruturas complem. da rede e o comprimento total da rede |
| Ers03 | Relação entre a massa de material removido de gradeamento e caixa de areia e o comprimento da rede |
| Ers04 | Relação entre a massa de sedimentos removidos de sistemas locais pela população atendida por este sistema |
| Ers05 | Relação entre a massa de sedimentos removidos do sistema e a massa de lodo bruto gerado no tratamento |
| Destino dos sedimentos | |
| Ers06 | Porcentagem da massa total de sedimentos removidos do sistema, dispostos adequadamente. |

Como próxima etapa, foram identificadas as variáveis necessárias para viabilizar a aplicação dos indicadores e, portanto, os dados a serem obtidos com os operadores das estações de tratamento de esgoto. Após a listagem de todos os dados requeridos, foi elaborado o formulário para coleta de dados, utilizado para consulta aos gestores das ETEs. Nota-se que, para aplicar 36 ID, há necessidade de se obter 46 variáveis.

4.2 Seleção das estações de tratamento de esgoto para aplicação dos ID

Com a finalidade de aplicar o compilado de indicadores de desempenho, foi definida a região de abrangência da pesquisa pela UGRHI 15 Turvo/

Grande. Localizada na região noroeste do estado de São Paulo, essa unidade contempla 75 municípios, com área de drenagem de 15.917,89 km² (Comitê da Bacia Hidrográfica dos Rios Turvo e Grande, 2021).

Para tanto, foram definidos dez municípios dentro da área de abrangência delimitada, que possuíam estação de tratamento de esgoto em seu território. A pesquisa limitou a aplicação a municípios com população superior a dez mil habitantes, de acordo com o censo demográfico de 2010 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010). Dentre os municípios que se enquadraram no critério estabelecido, optou-se

por incluir na aplicação da pesquisa aqueles que compreendessem maiores variações de faixas populacionais, de modo que fossem analisados

municípios de diferentes portes. A Figura 2 apresenta a localização de cada ETE no contexto da unidade hidrográfica.

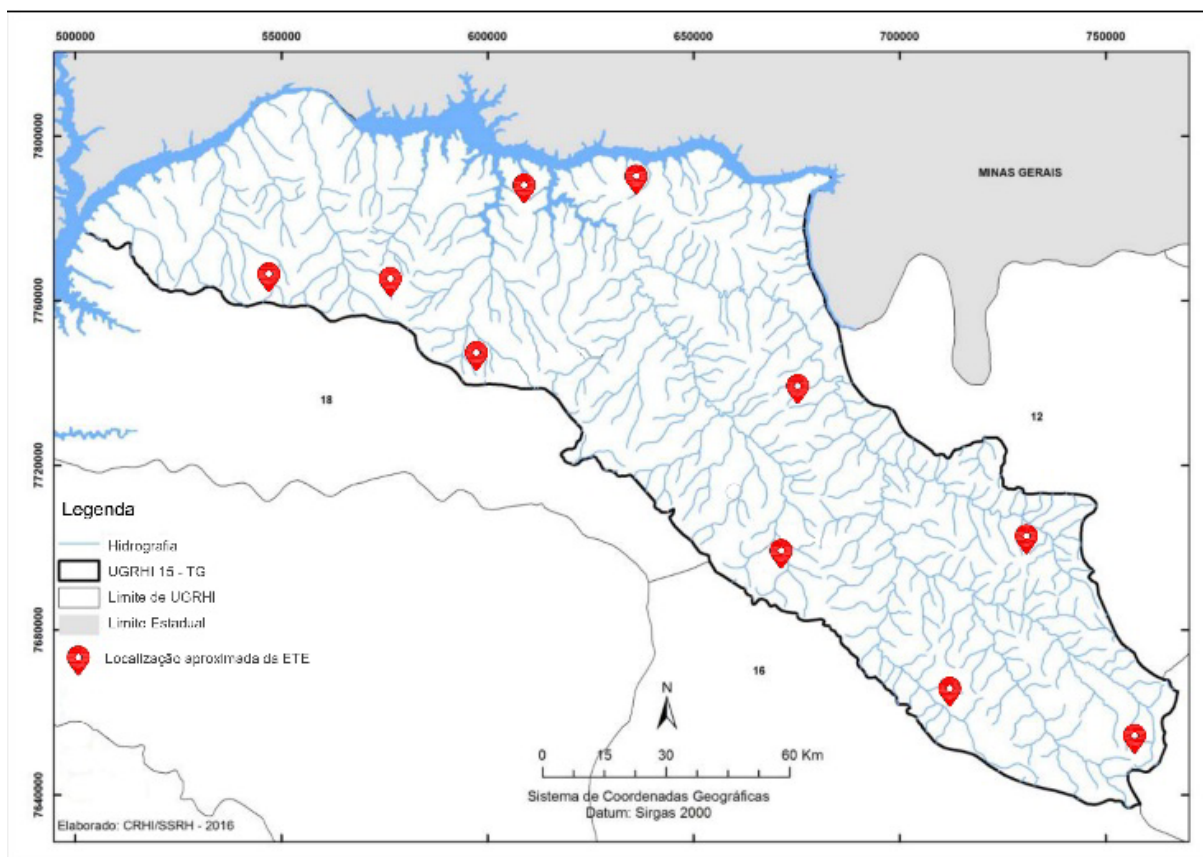


Figura 2 – Localização dos municípios selecionados na área de abrangência da UGRHI 15.

A partir do levantamento inicial das ETEs, foi realizado contato com cada uma delas, solicitando os dados requeridos para aplicação dos ID. Das dez estações, houve devolutiva de nove, sendo que, entre estas, cinco forneceram dados que se enquadravam no escopo desta pesquisa. A Tabela 2 relaciona o identificador atribuído às ETEs com a faixa populacional do município, a vazão média de operação, a tecnologia empregada no tratamento e a conduta em relação ao manejo do lodo, resultando ainda na relação de estações com dados disponibilizados (DD) ou dados não disponibilizados (DND) para a aplicação dos indicadores de desempenho.

A coleta dos dados foi realizada por meio de formulário, encaminhado de forma digital ou aplicado presencialmente de acordo com a disponibilidade dos operadores. Os dados coletados em cada uma das ETEs foram tabelados a fim de permitir a aplicação por meio de planilhas digitais. Os dados não informados pelos operadores foram identificados com a sigla DND.

4.3 Resultados da aplicação dos Indicadores de Desempenho

Após a coleta dos dados requeridos, estes foram aplicados em planilhas digitais para cálculo dos

indicadores de desempenho. Os indicadores que não puderam ser aplicados, por insuficiência de dados, foram identificados com a sigla IA

(impossibilidade de aplicação). A Figura 3 ilustra a proporção entre indicadores com resultados válidos e com impossibilidade de aplicação.

Tabela 2 – Identificação das ETEs selecionadas.

| Identificação ETE | Faixa populacional município | Vazão média anual | Tecnologia de Tratamento | Contexto do LETE | Dados para aplicação dos ID |
|-------------------|------------------------------|-------------------|---|-------------------|-----------------------------|
| ETE1 | 10 mil | 15,88l/s | Lagoa anaeróbia + facultativa | Nunca removido | DND |
| ETE2 | 11 mil | 22,60l/s | Lagoa anaeróbia + facultativa + maturação | Nunca removido | DND |
| ETE3 | 12 mil | 17,48l/s | Lodos ativados por aeração prolongada | Remoção periódica | DD |
| ETE4 | 15 mil | 18,61l/s | Lagoa anaeróbia + facultativa | Remoção única | DND |
| ETE5 | 20 mil | 28,72l/s | Lagoa anaeróbia + facultativa | Remoção única | DD |
| ETE6 | 40 mil | 50,81l/s | Lodos ativados por aeração prolongada | Remoção periódica | DD |
| ETE7 | 50 mil | 83,58l/s | Lagoa anaeróbia + facultativa | Nunca removido | DND |
| ETE8 | 60 mil | 77,85l/s | Lagoa anaeróbia + facultativa | Remoção única | DD |
| ETE9 | 100 mil | - | Lagoa aerada + lagoa de sedimentação | Remoção periódica | DND |
| ETE10 | 400 mil | 1205l/s | Up Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) + Lodos ativados convencional | Remoção periódica | DD |

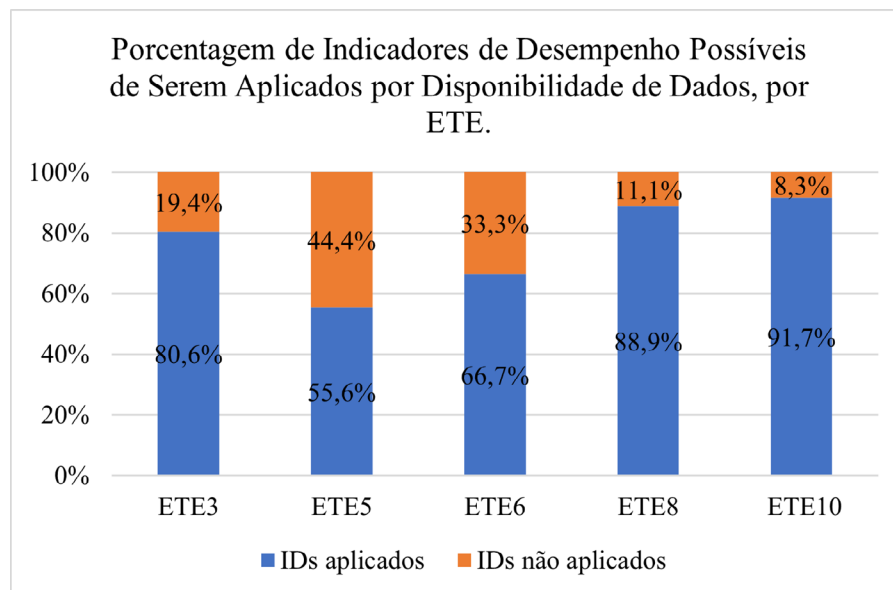


Figura 3 – Porcentagem de ID possíveis de serem aplicados por disponibilidade de dados, por ETE.

Verifica-se que, em todas as ETEs analisadas, houve indicadores que não puderam ser aplicados, variando de 8,3% a 44,4% do total de indicadores. A ETE5 apresentou maior número de indicadores não aplicados, com 44,4% do total de indicadores,

seguida da ETE6 (33,3%), da ETE3 (19,4%), da ETE8 (11,1%) e da ETE10 (8,3%) dos ID não aplicados.

A partir da análise dos resultados obtidos, percebeu-se a escassez de dados em relação a alguns parâmetros. Entre eles, encontra-se o consumo de

energia elétrica no manejo do lodo, com dados fornecidos por apenas uma das ETEs. Em sequência, com dados disponibilizados por apenas duas ETEs, estão: o custo de operação da ETE, os custos com processamento e descarte do lodo, e a massa de lodo bruto gerado. Essa carência de informações revela pouca atenção por parte dos operadores em relação a esses parâmetros.

As informações fornecidas pelos operadores referentes aos dados de encaminhamento do lodo bruto para tratamento ou disposição final – requeridos nas variáveis “massa de lodo bruto encaminhado para tratamento em outra ETE (anual)”, “massa de lodo bruto encaminhado para tratamento na própria ETE (anual)”, “massa de lodo bruto encaminhado para desaguamento (anual)” e “massa de lodo bruto encaminhado para secagem (anual)” – aludem a apenas uma fração do lodo gerado encaminhado para cada processo, não havendo mensuração real da massa do resíduo.

Os resultados obtidos com as análises laboratoriais do lodo são de extrema importância para a reutilização dos resíduos gerados. No entanto, em nenhuma das ETEs nas quais foi realizada análise do lodo os resultados foram comparados com as exigências normativas para sua utilização na agricultura, destacando a desatenção dessas estações com as possibilidades de reutilização do resíduo.

Em relação às análises laboratoriais, os ID demonstram que estas são realizadas exclusivamente objetivando o descarte final do lodo processado, inclusive a análise de teor de sólidos. O número requerido de análises é determinado de acordo com o destino pretendido, conforme Resolução Conama n. 498/2020 (Brasil, 2020) para o reúso em solos, ou conforme determinação do órgão regulamentador ambiental do estado em questão para disposição em aterro sanitário.

Os indicadores que abordam a destinação final do lodo processado revelam que em nenhuma das ETEs analisadas é realizada destinação ao

uso benéfico; verificou-se que em todas as ETEs que já realizaram a destinação final do lodo esse destino foi o aterro sanitário. A disposição final em aterro sanitário não atende a recomendação da PNRS (Brasil, 2010) no que se refere ao reúso de resíduos.

Os ID referentes aos custos puderam ser aplicados em apenas duas das cinco ETEs e revelaram uma relação decimal entre o custo de manejo do lodo e o volume de esgoto tratado. A relação entre o custo de manejo do lodo e o custo de operação das ETEs se mostra mais relevante, na casa dos 14% e 36%. No entanto, os valores fornecidos pelos operadores não abordam a totalidade dos custos, não sendo considerados, por exemplo, os custos com funcionários e destinação final. Dessa forma, os valores obtidos podem não refletir a realidade total das ETEs.

4.4 Análise da aplicabilidade dos indicadores de desempenho

A aplicação dos indicadores de desempenho permitiu a comparação, para cada parâmetro, entre as ETEs analisadas, avaliando assim a capacidade de cada estação em mensurar os parâmetros relacionados ao lodo gerado, o tipo de manejo ao qual o lodo é submetido e, conseqüentemente, a qualidade da gestão desse resíduo. Por meio da aplicação periódica dos ID, é possível observar também o processo de melhoria ao longo do tempo para cada parâmetro analisado.

Sabendo-se as variáveis necessárias para a aplicação dos indicadores de desempenho, os operadores interessados em promover melhorias no sistema de gestão do lodo de esgoto são capazes de implantar métodos de medição mais precisos e setorizados para coletar as informações referentes aos parâmetros analisados. Por outro lado, a grande quantidade de informações requeridas para a aplicação da totalidade de indicadores de desempenho pode dificultar o acompanhamento periódico do processo de gestão do lodo. Isso se reflete na ausência de dados

disponibilizados pelas ETEs e na impossibilidade de aplicação de diversos ID.

4.5 Proposição de indicadores de desempenho estratégicos

Considerando a complexidade encontrada em aplicar a totalidade dos indicadores de desempenho, um procedimento que pode ser eficaz para o uso de indicadores como um instrumento de gestão eficiente é a seleção de um conjunto reduzido de ID, que abordem os principais parâmetros a serem observados em relação ao lodo de esgoto. Com o uso desses indicadores, denominados indicadores de desempenho estratégicos, procura-se avaliar os aspectos mais relevantes da gestão do lodo que possam ser calculados a partir de variáveis de simples obtenção pelos operadores.

Sendo assim, os ID selecionados foram chamados de indicadores estratégicos para o lodo de esgoto (IEL), resultando em um conjunto de sete indicadores relacionados à geração do lodo, no que se refere à quantidade e qualidade, à destinação ao tratamento e destinação final, aos custos associados ao seu manejo e à geração de outros resíduos.

Em relação à quantidade e qualidade do lodo gerado, foram selecionados os ID “Egl02 – Relação entre a massa de lodo processado gerado e o volume de esgoto tratado” e “Etl07 – Concentração de sólidos secos do lodo processado”. A partir desses ID, entende-se que é possível comparar a geração de lodo em ETEs com diferentes capacidades de tratamento e a eficiência do processo de desaguamento ao qual o lodo está sendo submetido.

Quanto à destinação do lodo ao tratamento, atribuiu-se o indicador “Etl02 – Porcentagem de lodo bruto gerado na ETE encaminhado para tratamento na própria unidade”, e para avaliar a destinação final do lodo foram designados os ID “Edl01 – Relação entre a massa de lodo processado destinado ao uso benéfico e a massa total de lodo processado” e “Edl03 – Relação entre a

massa de lodo processado disposto em aterro ou incinerado e a massa total de lodo processado”.

Para a avaliação dos custos associados ao manejo do lodo de esgoto, o indicador selecionado foi “Ecl02 – Relação entre os custos de processamento e descarte de lodo e o custo de funcionamento da ETE”. A partir desse indicador, espera-se elucidar aos operadores o impacto representado pelo manejo do lodo, e como aprimorar a gestão desse resíduo pode repercutir sobre o custo de operação da ETE.

Os sedimentos acumulados no sistema de tratamento foram abordados pelo ID “Ers05 – Relação entre a massa de sedimentos removidos do sistema e a massa de lodo bruto gerado no tratamento”. Procura-se avaliar, dessa forma, o total de resíduos sólidos gerados no tratamento.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos sete IEL para as ETEs analisadas.

Os resultados de aplicação dos ID estratégicos nas ETEs analisadas revelam que esses parâmetros, considerados como de maior relevância, não estão sendo avaliados de forma eficaz em todas as ETEs.

A ETE5 apresentou impossibilidade de aplicação em cinco dos sete indicadores, o que representa mais de 70% do conjunto de ID. Nas ETE3 e ETE6, não puderam ser aplicados dois indicadores, isto é, 28% dos IEL. Para a ETE8, um indicador não foi aplicado, o que corresponde a 14% dos ID estratégicos. Apenas para a ETE10 foi possível a aplicação de todos os IEL, o que corrobora a necessidade de aperfeiçoamento dos métodos de monitoramento do manejo do lodo.

Com o uso dos indicadores de desempenho estratégicos, a quantidade de variáveis necessárias para aplicação do conjunto de sete indicadores estratégicos foi reduzida de 46 para 10. Essa quantidade substancialmente menor viabiliza a mensuração dos dados de forma mais criteriosa, repercutindo em resultados com grau de confiança mais elevado.

Tabela 3 – Resultado da aplicação dos sete IEL, por ETE analisada.

| Cod. IEL | Cod. ID | Descrição | ETE3 | ETE5 | ETE6 | ETE8 | ETE10 | Unidade |
|----------|---------|--|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| IEL1 | Egl02 | Relação entre a massa de lodo processado gerado e o volume de esgoto tratado | 0,05 | IA | 0,23 | 0,01 | 0,43 | (kg/m³) |
| IEL2 | Etl07 | Concentração de sólidos secos do lodo processado | 90,80 | IA | 80,00 | IA | 19,96 | % |
| IEL3 | Etl02 | Porcentagem de lodo bruto gerado na ETE encaminhado para tratamento na própria unidade | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | % |
| IEL4 | Edl01 | Relação entre a massa de lodo processado destinado ao uso benéfico e a massa total de lodo processado | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | % |
| IEL5 | Edl03 | Relação entre a massa de lodo processado disposto em aterro ou incinerado e a massa total de lodo processado | 100,00 | IA | 100,00 | 0,00 | 100,00 | % |
| IEL6 | Ecl02 | Relação entre os custos de processamento e descarte de lodo e custo de funcionamento da ETE | IA | IA | IA | 13,97 | 36,30 | % |
| IEL7 | Ers05 | Relação entre a massa de sedimentos removidos do sistema e a massa de lodo bruto gerado no tratamento | IA | IA | IA | 0,24 | 0,03 | (kg sed/ kg lodo) |

Os indicadores estratégicos propostos foram selecionados objetivando abordar amplamente os aspectos relacionados com a gestão do lodo de esgoto, e, simultaneamente, simplificar o levantamento de dados por parte dos operadores.

5 CONCLUSÕES

É notório que a gestão do sistema de esgotamento sanitário de forma holística é fundamental para o total cumprimento da Política Nacional de Saneamento Básico, incluindo todas as etapas que compõe o sistema, em especial as relacionadas ao lodo gerado durante o tratamento do esgoto, que é comumente negligenciado pelos operadores. Para tanto, os indicadores de desempenho se mostram uma ferramenta importante para auxiliar a gestão.

A partir da seleção inicial de indicadores de desempenho relacionados ao sistema de esgotamento sanitário e da análise da distribuição dos ID entre as categorias propostas, é evidente a diferença de enfoque nas fontes pesquisadas.

No que diz respeito aos indicadores relativos à gestão do lodo de esgoto, estes foram identificados em apenas três fontes, sendo todas publicações internacionais e em número bastante reduzido comparado ao total de indicadores levantados

– o equivalente a apenas 5% do total. A ausência de indicadores que abordam esse parâmetro nas publicações brasileiras destaca a incipiência e a dificuldade em âmbito nacional quanto à gestão desse resíduo.

A aplicação dos indicadores de desempenho nas ETEs analisadas confirma a prerrogativa da desatenção que ocorre no Brasil em relação à gestão do manejo do lodo de esgoto. A grande quantidade de dados indisponíveis ou não confiáveis demonstra a necessidade de aprimoramento nesse âmbito.

Como recomendação para impulsionar os avanços na gestão desse resíduo, e entendendo que o aprimoramento do manejo do lodo está diretamente associado à exigência de dados pelas fontes oficiais, incluir em fontes oficiais nacionais, como o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), os indicadores de desempenho estratégicos – denominados de IEL – propostos neste trabalho pode proporcionar avanços significativos em relação à atenção dispensada pelos operadores a gestão do lodo.

Por fim, conclui-se que os indicadores de desempenho são um instrumento eficiente para a gestão do lodo de esgoto. Verificou-se ainda que

a utilização do conjunto de indicadores estratégicos proposto, em número reduzido, mostra-se mais apropriada para aplicação nas ETEs, devido ao número menor de variáveis necessárias, e, portanto, factíveis de serem obtidas pelos operadores.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Gandolphi C, Achon CL;
Metodologia: Gandolphi C, Achon CL; **Investigação:** Gandolphi C, Achon CL; **Redação – Primeira versão:** Gandolphi C; **Redação – Revisão e Edição:** Gandolphi C, Achon CL; **Supervisão:** Achon CL.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL; CÂMARA TEMÁTICA DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA O SANEAMENTO AMBIENTAL. **GRMD – Guia de referência para medição do desempenho 2022.** Rio de Janeiro: ABES; CTIDSA, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 24511: Atividades relacionadas aos serviços de água potável e de esgoto – Diretrizes para a gestão dos prestadores de serviços de esgoto e para a avaliação dos serviços de esgoto** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Gestão de resíduos dos serviços de saneamento (água e esgoto), a Lei 12.305/2010: os desafios no Brasil. *In*: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 35.; CONGRESSO INTERNACIONAL DE ACODAL, 59., Cartagena, 2016. **Anais [...]**. Bogotá: ACODAL, 2016.

BARROS, I. P. A. F. **Proposta de um sistema de indicadores de desempenho para avaliação de estações de tratamento de esgotos do Distrito Federal.** 2013. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm#. Acesso em: 17 jan. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da**

União, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 17 jan. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

COLLIVIGNARELLI, M. C *et al.* The performance evaluation of wastewater service: a protocol based on performance indicators applied to sewer systems and wastewater treatment plants. **Environmental Technology** Londres, v. 43, n. 22, p. 3426-3443, 2021. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1922509>

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS TURVO E GRANDE. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos.** São José do Rio Preto: 2021. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-TG/21648/tg_rs_2021_relatorio-situacao-cbh-tg-ano-base-2021.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

DORSA, A. C.; PEREIRA, M. A. de S.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C. Indicators of water supply and domestic outdoor services in the Latin American integration route. **Interações** Campo Grande, v. 20, n. 2, p. 237-253, 2019. <https://doi.org/10.20435/inter.v21iespecial.2104>

ENTIDADE REGULADORA DOS SERVIÇOS DE ÁGUAS E RESÍDUOS (Coord.). **Guia de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores.** 4ª geração do sistema de avaliação. Lisboa: ERSAR, 2021.

GALVÃO JÚNIOR, A. C.; SILVA, A. C. (Ed.). **Regulação: indicadores para a prestação de serviços de água e esgoto.** 2. ed. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010.** Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

MATOS, R. *et al* **Indicadores de desempenho para serviços de águas residuais.** Lisboa: IRAR; LNEC, 2004.

QUADROS, S. *et al* A performance indicators system for urban wastewater treatment plants. **Water Science and Technology** Oxford, v. 62, n. 10, p. 2398-2407, 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.526>

ROSA, M. J. *et al* PAST21 – Iniciativa nacional de avaliação de desempenho de ETA e ETAR urbanas. *In*: CONGRESSO DA ÁGUA, 10., 2010, Alvor. **Anais [...]**. Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2010.

SILVA, A. R. da; ACHON, C. L. II-052 – Manejo do lodo de ETE (LETE), riscos ocupacionais e a destinação no Brasil – ETES com lodos ativados e reatores anaeróbios do tipo UASB (estudo de casos). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2019.

SILVA, C. *et al.* Results of ‘PAST21’ – the Portuguese initiative for performance assessment of water and wastewater treatment

plants. **Water Supply**, Londres, v. 12, n. 3, p. 372-386, 2012. <https://doi.org/10.2166/ws.2012.004>

SILVA, C.; MATOS, J. S.; ROSA, M. J. Estratégia para o desenvolvimento da 3.^a geração do sistema de avaliação de desempenho de ETAR. **Revista Águas & Resíduos** Lisboa, v. IV, n. 1, p. 70-82, 2016. <https://doi.org/10.22181/aer.2016.0107>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Glossário de Indicadores** – Água e Esgotos. Brasília, DF: SNIS, 2020.

SUPERINTENDENCIA NACIONAL DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO. **Informe Anual 2021**: grupo regional de trabajo de benchmarking de ADERASA. Lima: SUNASS, 2021.