

CENÁRIO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM UNIVERSIDADES BRASILEIRAS

SCENARIO OF SEWAGE TREATMENT SYSTEMS IN BRAZILIAN UNIVERSITIES

Juliana Branco^a, Rafael Jansen Mikami^a

^aUniversidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

k0.julianab@gmail.com, rjmikami@outlook.com

Submissão: 26 de abril de 2024

Aceitação: 13 de novembro de 2024

Resumo

A implementação de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto em ambientes universitários não só enriquece atividades de ensino, pesquisa e extensão, como também contribui para mitigar possíveis déficits de tratamento na área urbana e demonstra o compromisso socioambiental da instituição. Este estudo, por meio de revisão bibliográfica, avalia cinco universidades com suas próprias estações de tratamento. Analisa suas características, os desafios operacionais, a eficiência do sistema e o seu potencial como recurso universitário. Conclui-se que há uma preferência por sistemas compactos, em especial lodos ativados, apesar do custo relacionado à mecanização e manejo do lodo; três instituições possuem estruturas subutilizadas; todas as instituições apresentaram problemas operacionais ao longo do tempo de operação dos sistemas, como infiltração de água da chuva e frequência inadequada de limpeza; os resultados de caracterização do efluente demonstram eficiências variadas de remoção de matéria orgânica, de 2,4% a 60%, e coliformes termotolerantes com 4 a 5 unidades de log; as publicações derivadas abrangem desde análises do sistema implantado até o uso de subprodutos em estudos, como lodo e efluente, bem como projetos de ensino interdisciplinar e extensão à comunidade.

Palavras-chave: efluente; reúso; campus universitário.

Abstract

The implementation of decentralized sewage treatment systems in university environments not only enriches teaching, research and extension activities, but also helps mitigate potential treatment deficits in urban areas and demonstrates the institution's socio-environmental commitment. This study, through a bibliographic review, evaluates five universities with their own treatment plants. It analyzes their characteristics, operational challenges, system efficiency and their potential as a university resource. The study concludes that there is a preference for compact systems, particularly activated sludge, despite the costs associated with mechanization and sludge management; three institutions have underutilized structures; all institutions encountered operational issues over time, such as rainwater infiltration and inadequate cleaning frequency; effluent characterization results showed varied efficiencies in organic matter removal, ranging from 2.4% to 73.3%, and thermotolerant coliforms with a reduction of 4 to 5 log units; derived publications range from system analysis to the use of by-products in studies, such as sludge and effluent, as well as interdisciplinary teaching and community extension projects.

Keywords: effluent; reuse; university campus.

1 INTRODUÇÃO

A cobertura deficiente do tratamento de esgotos no Brasil persiste como um problema

significativo. Conforme evidenciado pelos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), referentes a 2021, apenas 51,17% dos esgotos gerados no país foram

tratados. Entre as 100 cidades mais populosas do Brasil, Duque de Caxias, Belford Roxo e São João de Meriti estão entre as 10 piores colocadas no *ranking* de tratamento de esgoto, com índices de 5,95%, 4,72% e 0,00%, respectivamente (Oliveira; Scazufca; Sayon, 2023). A baixa colocação de três municípios com alta densidade populacional do Rio de Janeiro ilustra como o desafio para um tratamento eficaz não se limita a regiões isoladas, mas também atinge grandes centros urbanos.

Em um sistema convencional de saneamento, o esgoto gerado em uma região de contribuição é transportado por meio de redes coletoras até uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) centralizada, próxima a um corpo hídrico para destinação final. Segundo Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), estima-se que 75% do custo de implantação de um sistema de esgotamento sanitário é devido às redes coletoras.

Uma alternativa para reduzir os investimentos em infraestrutura para canalização é a adoção de sistemas descentralizados, ou satélites, de tratamento. Esse modelo permite tratar o esgoto em locais próximos aos usuários, possibilitando o reúso do efluente para diversas finalidades, como irrigação de áreas verdes, descarga em bacias sanitárias e até mesmo fins paisagísticos (Metcalf; Eddy, 2016). É uma abordagem que não apenas otimiza recursos, mas também reduz a necessidade de extensa infraestrutura de transporte, tornando-se uma solução mais versátil e adaptável às necessidades locais.

Paralelamente, as universidades podem ser equiparadas a pequenos núcleos urbanos, em especial no que se refere à concentração de infraestrutura. Os *campi* universitários de grande porte possuem uma estrutura organizacional própria, composta por diferentes departamentos, áreas de habitação para estudantes, serviços de alimentação, saúde e recreação (Tauchen; Brandli, 2006).

Nesse sentido, o esgoto gerado em *campi* universitários é proveniente de várias fontes, como restaurantes, banheiros coletivos e até laboratórios. Apesar de similar ao doméstico, não é possível desconsiderar a possibilidade de contaminação do esgoto por substâncias tóxicas, por meio do despejo indevido de resíduos laboratoriais em pias ou da limpeza de equipamentos utilizados em experimentos (Rattova, 2012). Em uma análise do lodo produzido pela estação de tratamento da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, foi observada uma concentração atípica de metais

como cromo, níquel, zinco, chumbo e cobre, evidenciando o carreamento dessas substâncias pelo sistema (Cavalcanti, 2019). Portanto, é essencial realizar a caracterização do esgoto para estabelecer diretrizes de projeto.

Tendo em vista a cobertura deficiente do tratamento de esgoto em áreas urbanas, a implantação de um sistema descentralizado emerge como uma alternativa promissora, principalmente nos *campi* universitários. Estes são ambientes caracterizados pela produção intelectual e que incentivam o trabalho de investigação científica, conforme previsto nos artigos 43 e 52 da Lei de Diretrizes e Bases da Educação (Brasil, 1996). Portanto, pode haver um estímulo para a utilização desse sistema em atividades de pesquisa, visando refinar as tecnologias existentes, pois o ensino e a extensão também representam um meio concreto para promover o desenvolvimento sustentável da sociedade. Por fim, o tratamento do esgoto e o reúso do efluente demonstram um compromisso efetivo com a responsabilidade socioambiental da instituição (Gama *et al.*, 2020).

Nesse cenário, o presente artigo visa analisar uma amostra dos sistemas de tratamento de esgoto implantados em universidades brasileiras, a fim de compreender as particularidades, os desafios operacionais, a eficiência de remoção dos parâmetros e o potencial desses sistemas como recurso para ensino, pesquisa e extensão.

Trata-se de um estudo exploratório conduzido por meio de revisão bibliográfica, que incluiu a pesquisa em bancos de teses, dissertações e artigos científicos. Inicialmente, foi realizada uma busca abrangente no Portal de Periódicos da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), utilizando palavras-chave relacionadas ao tema e, após a seleção das universidades, a pesquisa foi direcionada para as bases de dados *online* específicas de cada instituição. O critério de seleção das universidades foi baseado na disponibilidade de estudos sobre o sistema de tratamento de esgoto de cada instituição, visando reunir o maior número de informações para a análise comparativa. Ao todo foram selecionados 7 artigos, 11 monografias, 10 dissertações e uma tese, totalizando 29 pesquisas provenientes de 5 universidades distintas.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Níveis de tratamento do esgoto

O tratamento do esgoto geralmente inicia pela etapa preliminar, que visa a remoção de sólidos grosseiros e areia utilizando grades e desarenadores. Em nível primário são removidos os sólidos suspensos sedimentáveis e flutuantes, reduzindo também a carga orgânica (Sperling, 2007). Os métodos mais utilizados envolvem a separação gravitacional, seja por sedimentação ou flotação (Metcalf; Eddy, 2016).

O tratamento secundário emprega processos predominantemente biológicos por meio de microrganismos. Nesse nível, conforme Sperling (2007), a eficiência de remoção de sólidos sedimentáveis atinge 65% a 95%; de matéria orgânica, 60% a 99%; e de coliformes, 60% a 99%.

Embora não adotado em todos os casos, o tratamento terciário é constituído por processos avançados para remoção de compostos remanescentes, como nutrientes, metais e patógenos (Metcalf; Eddy, 2016). Utilizam-se métodos físicos, químicos ou biológicos, como radiação ultravioleta (UV), cloração ou lagoas de estabilização, respectivamente (Gonçalves, 2003).

Segundo Lima *et al.* (2021), com base em dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), apenas 7% do total de efluentes tratados no Brasil possui nível terciário de tratamento, sendo lagoas de maturação utilizadas na maioria dos casos existentes. Ainda, quase 30% do total passam apenas pelo estágio primário ou primário avançado, com eficiência de remoção da matéria orgânica inferior a 80%.

2.2 Tratamento biológico do esgoto

Em processos de tratamento biológicos, a degradação da matéria orgânica ocorre de maneira natural, podendo ser por bactérias, arqueias, protozoários, fungos e outros organismos, a depender de condições específicas. A degradação aeróbia é descrita por Metcalf e Eddy (2016) como um processo de conversão de matéria orgânica e nutrientes em biomassa e produtos finais simples, que ocorre na presença de oxigênio dissolvido livre. Nesse contexto, a biomassa se refere um denso agrupamento de microrganismos e matéria orgânica, o qual pode ser removido por processos físicos. Na degradação anaeróbia, o processo ocorre na ausência de oxigênio dissolvido livre, demarcado pelas fases de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Sperling, 2007).

Os dados mais recentes da ANA (2020), referentes a 3.668 estações de tratamento em 2.007 municípios, revelam que 84% das estações

de tratamento de esgoto no Brasil estão distribuídas em três grupos: reatores anaeróbios isolados ou com pós-tratamento (37%), sistemas de lagoas em diferentes configurações (35%) e processos simplificados (12%). Esse cenário demonstra como há grande demanda por tratamentos biológicos com soluções simples, econômicas e sustentáveis no país.

O reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB) caracteriza-se pela presença de biomassa tanto sedimentada no fundo (leito), quanto suspensa em forma de grânulos (manta). O esgoto é introduzido pelo fundo do reator, seguindo um fluxo hídrico ascendente, enquanto o biogás gerado é liberado pela saída superior. O separador trifásico é uma estrutura característica desse reator, que divide as frações líquida, sólida e gasosa do esgoto. A redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) está usualmente entre 45% e 85%, sendo necessário pós-tratamento na maioria dos casos (Jordão; Pessoa, 2011; Metcalf; Eddy, 2016; Sperling, 2007).

As lagoas de estabilização são sistemas abertos que dispõem de luz solar e empregam microrganismos aeróbios e anaeróbios. Existem três variações principais – anaeróbias, facultativas e de maturação – que, usualmente, são utilizadas em sucessão para maior eficiência. Lagoas anaeróbias são projetadas com maior profundidade, favorecendo condições sem oxigênio. As lagoas facultativas, de profundidade intermediária, combinam microrganismos aeróbios na superfície e anaeróbios no fundo. As lagoas de maturação, mais rasas, promovem a desinfecção do efluente principalmente pela incidência da radiação ultravioleta da luz solar. Outros processos naturais de desinfecção também ocorrem em lagoas, como sedimentação, retenção física, competição, predação e morte natural (Dias; Passos; Sperling, 2017; Sperling, 2007).

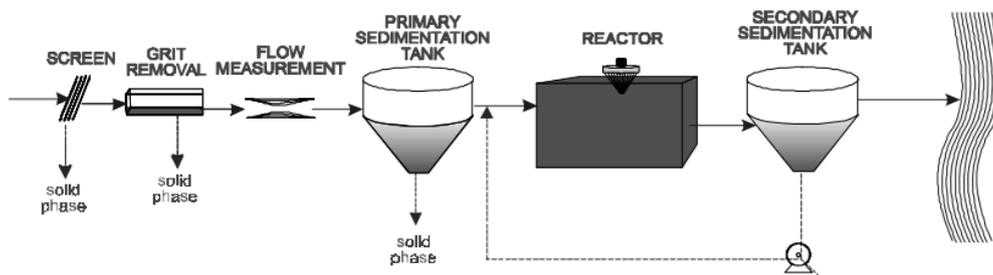
Os processos simplificados são métodos de tratamento de esgoto rudimentares, geralmente aplicados em comunidades pequenas ou em áreas rurais. Entre as tipologias mais utilizadas no Brasil, o conjunto de fossa séptica seguida por filtro anaeróbio corresponde a 73% do total de tratamentos simplificados (ANA, 2020). A fossa séptica consiste em uma câmara que abriga o esgoto por um tempo estipulado até sua degradação de forma anaeróbia, enquanto permite a sedimentação de sólidos e retenção do material graxo na superfície do líquido. Já o filtro subsequente atua pela percolação do líquido

efluente em um meio suporte, como brita, onde existem microrganismos aderidos (Jordão; Pessoa, 2011).

Cerca de 10% das estações de tratamento no país utilizam o sistema de lodos ativados, predominantemente nas áreas urbanas mais adensadas (ANA, 2020). O conjunto tradicional do sistema (Figura 1) é composto por um tanque para decantação inicial (nível primário de tratamento), seguido por um reator e decantação secundária. Seu funcionamento é baseado na presença de oxigênio dissolvido, mantido por aeradores no reator, além da constante recirculação do lodo da decantação secundária para o reator, por

bombeamento. Na modalidade de aeração prolongada, o tempo de detenção do líquido e do lodo é maior, levando à estabilização da biomassa no próprio reator (Jordão; Pessoa, 2011). A idade do lodo atinge de 18 a 30 dias, enquanto na configuração convencional esse valor está entre 4 e 10 dias. Assim, a aeração prolongada permite uma simplificação do sistema original, através da retirada da decantação primária e das unidades de estabilização do lodo. No entanto, o gasto energético é superior, devido à necessidade de suprir a aeração tanto para a remoção da DBO quanto para a digestão aeróbia do lodo (Sperling, 2007).

Figura 1 - Fluxograma típico do sistema convencional de lodos ativados



Fonte: Von Sperling (2007).

O valo de oxidação é um tipo de lodo ativado com aeração prolongada. Constitui-se de dois canais em formato orbital, adjacentes e interligados, equipados com aeradores que movimentam o líquido e fornecem oxigênio. Pode operar em regime contínuo, o qual requer um decantador secundário, ou em modo descontínuo, em que há a interrupção dos aeradores para permitir a sedimentação (Jordão; Pessoa, 2011).

2.3 Parâmetros de qualidade do efluente visando o reúso

Sendo a possibilidade de reúso não potável uma particularidade interessante ao tratamento descentralizado, é importante que o efluente apresente parâmetros adequados a esse fim. Os padrões de qualidade para reúso no Brasil são estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes, segundo as Resoluções nº 54/2005 e nº 121/2010 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 2005, 2010). Desse modo, não existem parâmetros federais nem todos os estados possuem parâmetros definidos.

Como referência, em normativas recentes dos estados do Paraná, Minas Gerais e Rio Grande do Sul foram definidos os seguintes

parâmetros para o reúso de água em fins urbanos: coliformes termotolerantes ou *Escherichia coli*, ovos viáveis de helmintos, pH, cloro residual total e condutividade elétrica (Minas Gerais, 2020; Paraná, 2023; Rio Grande do Sul, 2020). Com base nas diretrizes internacionais *Guidelines for Water Reuse* (USEPA, 2012), outros parâmetros importantes na avaliação do efluente para reutilização em áreas urbanas incluem turbidez e indicadores de matéria orgânica.

Tratando-se do reúso não potável, uma das práticas mais difundidas é a fertirrigação em cultivos agrícolas. O esgoto sanitário tende a conter uma concentração elevada de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, que podem ser preservados mesmo após o processo de tratamento e utilizados para suprir parcialmente a demanda pelas plantas (Santos; Mota Filho, 2022).

Contudo, organismos patogênicos presentes no efluente tratado representam grande ameaça à saúde humana (WHO, 2006). No reúso agrícola, a extensão da contaminação pode ser controlada pela espécie de cultivo, pelo método de irrigação e pela dose de aplicação (Santos; Mota Filho, 2022). Técnicas localizadas, como a irrigação por gotejamento, oferecem maior proteção aos

trabalhadores e minimizam a transferência de patógenos para a superfície da planta, pois a aplicação ocorre na raiz (WHO, 2006). Porém, são técnicas mais caras e com potencial para entupimentos, conforme a concentração de sólidos no efluente (Eslamian, 2016).

No espaço urbano, é possível aproveitar o efluente para fins não potáveis, como irrigação paisagística, lavagem de pisos, fachadas e veículos, descargas sanitárias, desobstrução de tubulações e reserva de proteção a incêndios. O reúso urbano é classificado como irrestrito ou restrito, sendo que no primeiro há possibilidade de contato humano, enquanto no segundo a exposição é controlada (USEPA, 2012).

2.3.1 Parâmetros biológicos e químicos orgânicos

A contaminação do efluente por patógenos é geralmente mensurada pelas bactérias do grupo coliforme e subgrupo termotolerante, o qual possui como principal representante a *Escherichia coli*. Embora a maioria das cepas de *E. coli* seja inofensiva, ela é considerada o indicador mais preciso de contaminação fecal e de maior presença no esgoto sanitário, pois é específica do trato intestinal de humanos e animais de sangue quente (Sperling, 2007). Porém, esse parâmetro não é suficiente para indicar a presença de vírus entéricos ou cistos de vermes e protozoários (Metcalf; Eddy, 2016). A aferição de vírus ocorre indiretamente por indicadores de desinfecção, enquanto os cistos pela existência de ovos viáveis de helmintos (Gonçalves, 2003).

Em locais onde os padrões de saneamento são insuficientes, os helmintos representam frequentemente os maiores riscos para a saúde (WHO, 2006). Segundo Gonçalves (2003, p. 4), “[...] em geral, basta um ovo ou larva para desencadear um processo infeccioso [...]”. São resistentes a métodos convencionais de desinfecção como a cloração, porém, devido à densidade e ao tamanho dos ovos (20-50µm), podem ser removidos por processos de separação físicos como sedimentação, filtração ou precipitação química (Metcalf; Eddy, 2016).

Considerando-se que a remoção de helmintos em lagoas de estabilização “[...] tem sido aceita como indicadora da remoção dos demais ‘organismos sedimentáveis’, incluindo cistos e oocistos de protozoários [...]” (Gonçalves, 2003, p. 79), adotou-se esse organismo como parâmetro para a retirada de outros patógenos que podem ser removidos por sedimentação.

É usual que a matéria orgânica biodegradável seja avaliada indiretamente pela demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que quantifica o oxigênio consumido por microrganismos durante o processo de estabilização, simulando a degradação natural que ocorre em corpos hídricos (Metcalf; Eddy, 2016). A demanda química de oxigênio (DQO) refere-se ao oxigênio no processo de oxidação química da matéria orgânica, abrangendo tanto a fração biodegradável quanto a inerte e, portanto, com valor resultante superior à DBO.

No efluente para reúso, a presença de matéria orgânica pode ser um fator relevante ao desenvolvimento de biofilme em tubulações e reservatórios. O biofilme é constituído por microrganismos aderidos a uma superfície, formando uma película e atuando como uma barreira protetora contra a ação de desinfetantes. Como resultado, a presença de matéria orgânica não apenas afeta a qualidade do efluente, mas também representa um risco adicional de proliferação bacteriana (Ren *et al.*, 2024; Kumjaroen; Chiemchaisri; Chiemchaisri, 2014).

2.3.2 Parâmetros físicos e químicos inorgânicos

O potencial hidrogeniônico (pH) do esgoto interfere em algumas etapas de tratamento, como desinfecção, coagulação química e processos de digestão aeróbia e anaeróbia (Jordão; Pessoa, 2011). Após o tratamento, o parâmetro é monitorado pela sua influência na solubilidade de metais, que se recomenda o intervalo de valor entre 6 e 8. Para o uso em fertirrigação, por exemplo, o níquel e o zinco apresentam menor toxicidade quando em pH neutro ou alcalino (WHO, 2006).

O parâmetro de cloro residual total é a soma do cloro livre, representado pelo ácido hipocloroso e íon hipoclorito, e do cloro combinado, formado pela reação com matéria orgânica, resultando em organoclorados e cloraminas. O cloro livre acima de 5mg/L pode danificar plantas; no entanto, a maior quantidade de cloro residual tende a estar na forma combinada, que não é prejudicial (Eslamian, 2016). É um parâmetro que pode indicar a ausência de patógenos após a desinfecção química por cloração, pois nesse caso, “[...] o mais frequente é alcançar a completa inativação ou destruição dos indicadores [de patógenos] e dos vírus” (Gonçalves, 2003, p. 78).

Segundo Von Sperling (2007), a fração de sólidos do efluente é dividida em suspensos, com tamanho superior a 10 µm, coloidais, entre 10 µm

e 10^{-3} μm , e dissolvidos, com tamanho inferior a 10^3 μm . Os sólidos suspensos podem atuar como anteparo para microrganismos aderidos, oferecendo proteção contra o contato com desinfetantes químicos ou mecanismos de desinfecção físicos, como a radiação ultravioleta. Após o tratamento, o excesso desse parâmetro pode causar obstruções em algumas técnicas de fertirrigação, como aspersão e gotejamento (Gonçalves, 2003; USEPA, 2012).

A turbidez expressa as mudanças de propagação da luz no efluente devido às partículas suspensas e coloidais, como argila, matéria orgânica e inorgânica, microrganismos, entre outras (APHA, 2017). O monitoramento contínuo de turbidez é indicado para mensurar o desempenho do tratamento, pois apresenta resultados imediatos, permitindo ajustes no sistema conforme necessário (USEPA, 2012).

É possível inferir a presença de sais e metais no efluente a partir do parâmetro de sólidos dissolvidos. Esses compostos estão associados à formação de incrustação, corrosão e biofilme em reservatórios e tubulações. No reúso para fertirrigação podem provocar danos ao solo, como salinização ou sodificação, bem como estresse osmótico ou toxicidade direta para as plantas. A irrigação urbana, no entanto, costuma ser destinada a plantas resistentes, como gramíneas, ou espécies em que não há expectativa de produção elevada (Eslamian, 2016; Gonçalves, 2003; USEPA, 2012; WHO, 2006).

Assim como o parâmetro de sólidos dissolvidos, a condutividade elétrica pode ser utilizada para determinar indiretamente a salinidade do efluente (USEPA, 2012). Para averiguar o impacto da salinidade na permeabilidade do solo é empregada a razão de adsorção de sódio, que corresponde à razão entre a concentração de sódio relativa à de cálcio e magnésio (Eslamian, 2016).

3 SISTEMAS DE TRATAMENTO EM UNIVERSIDADES

A seleção dos sistemas de tratamento deu-se pelo levantamento bibliográfico a respeito de ETEs inseridas em universidades do Brasil. Esse estudo comparativo engloba questões operacionais, a eficiência do tratamento e a contribuição do sistema como recurso para a comunidade acadêmica, por meio de publicações e projetos.

As publicações das seguintes instituições foram selecionadas: Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Universidade Federal do Rio

Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Universidade Federal de Sergipe (UFS) e Universidade de Passo Fundo (UPF).

No *Campus* Litoral Norte da UFRGS foi implantado em 2015 um sistema compacto de lodos ativados com aeração prolongada – contendo um reator aeróbio com difusores de ar, decantador secundário e posterior desinfecção com hipoclorito de sódio. Contudo, resultados de caracterização apontam que o efluente não atinge os padrões de qualidade adequados para reúso ou o despejo em corpos hídricos; dessa forma, é armazenado e enviado à companhia pública de saneamento (Albornoz, 2015; Albornoz *et al.*, 2016; Rodrigues; Antunes, 2021).

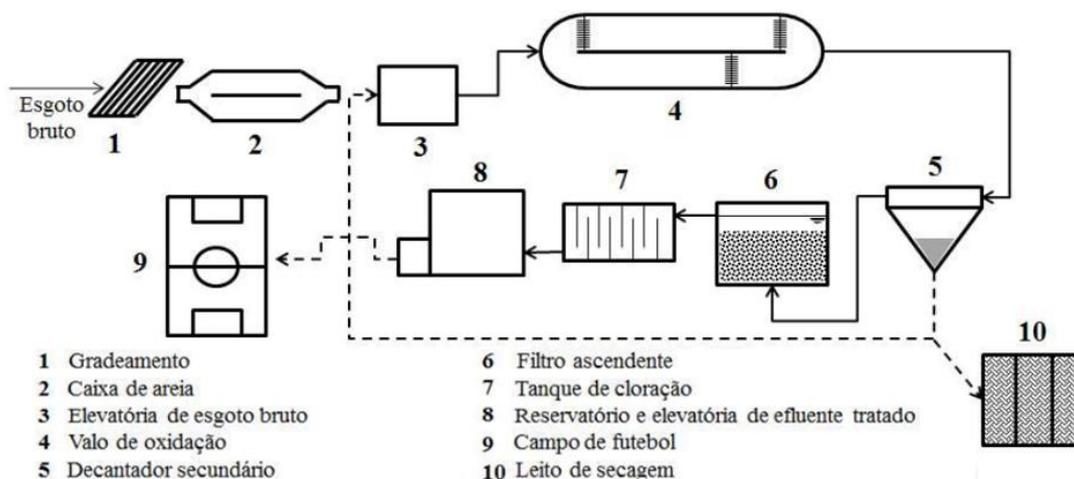
O *Campus* Chapecó da UFFS emprega o tratamento por lodos ativados com decantação primária e secundária, além de desinfecção por radiação UV. Conforme dados de 2017, o efluente liberado em um curso d'água atende parcialmente aos requisitos de lançamento, sendo relatada dificuldade na remoção de nitrogênio e fósforo. Apesar disso, a remoção de matéria orgânica é satisfatória, com eficiência média de 77% e DBO₅ média de 46 mg/L (Crizel; Lara, 2020).

Em Passo Fundo, o *Campus* I da UPF também utiliza o sistema de lodos ativados, porém precedido por um reator UASB (Goellner, 2010). Segundo von Sperling (2007), tendo em vista que o reator UASB retira até 70% da carga orgânica do esgoto, a unidade posterior de tratamento possui porte reduzido, produz menos lodo e consome menos energia em situações com aeração.

Em configuração similar, o *Campus* São Cristóvão da UFS emprega dois módulos UASB seguidos por valo de oxidação, operado em bateladas sequenciais. Esse modo de operação dispensa a necessidade de decantação posterior e recirculação de lodo, pois os aeradores são interrompidos em ciclos para permitir a sedimentação. O efluente, inicialmente planejado para reúso na irrigação, é direcionado para a rede de drenagem e liberado em um rio (Oliveira, 2019).

Entre as localidades selecionadas, o *Campus* Central da UFRN abriga o sistema mais antigo, em funcionamento desde 1983. A Figura 2 exibe um esquema da ETE. O tratamento principal consiste em valo de oxidação com decantação secundária e recirculação de lodo, seguido por filtro biológico ascendente de brita. O efluente é clorado e utilizado na irrigação de campos de futebol, áreas verdes do *Campus* e no cultivo de capim (Pinheiro, 2023).

Figura 2 - Esquema da Estação de Tratamento de Esgotos da UFRN



Fonte: Nobre (2018).

3.1 Avaliação operacional dos sistemas implantados

A Tabela 1 exibe as características dos sistemas de tratamento de esgoto selecionados.

As análises subsequentes consideram as informações disponíveis na época de cada publicação e podem não representar as condições atuais de operação.

Tabela 1 - Características dos sistemas de tratamento dos campi selecionados

Características do sistema	UFFS Chapecó	UFRGS Litoral Norte	UFRN Natal	UFS São Cristóvão	UPF Passo Fundo
Tratamento biológico Primeira unidade	Lodos ativados	Lodos ativ. (prolongado)	Valo de oxidação	UASB	UASB
Tratamento biológico Segunda unidade	N.A.	N.A.	Filtro biológico	Valo de oxidação	Lodos ativados
Tratamento terciário	Radiação UV	Cloração	Cloração	Cloração	N.A.
Ano de implantação	2013	2015	1983	2015	2006
Área estimada (m ²)	485	445	10.825	5.550	665
Vazão de projeto (m ³ /h)	*	1,46	58,32	49,61	14,48
Vazão de operação (m ³ /h)	*	0,25 (2016)	13,10 (2019)	7,20 (2018)	10,63 (2012)
População de projeto (hab)	*	700	*	23.804	18.000
População atendida (hab)	4.000 (2020)	200 (2021)	*	29.214 (2018)	22.000 (2012)

Fonte: adaptado de Crizel e Lara (2020), Albornoz *et al.* (2016), Rodrigues e Antunes (2021), Pereira (2021), Oliveira (2019), Souza *et al.* (2021), Rattova (2012), Google (2023, área estimada)

N.A.: Não aplicável

(*): Não disponível

Uma característica comum aos sistemas da UFFS, da UFRGS e da UPF é a baixa demanda

por espaço físico. Apesar da configuração compacta, o número de pessoas atendidas na UPF

é similar ao da UFS, que utiliza uma área cerca de 8 vezes maior. Tanto a UFRN quanto a UFS utilizam o valo de oxidação, ocupando aproximadamente 980,00 m² e 245,00 m² em cada *campus* (Google, 2023). O uso do reator UASB na UFS permite a redução considerável do espaço necessário para o valo devido à diminuição da carga de matéria orgânica inicial.

Existem diferenças significativas no gerenciamento de lodo e nos custos operacionais de cada sistema. O lodo líquido representa 180 L/hab.ano a 400 L/hab.ano para o reator UASB seguido por lodos ativados, enquanto que 1100 L/hab.ano a 3000 L/hab.ano é a estimativa para lodo ativado convencional. Embora o custo de construção seja similar, há uma discrepância em gastos operacionais de lodos ativados relacionada à aeração e bombeamento do processo (Sperling, 2007).

É perceptível como algumas ETES foram superdimensionadas com base nos dados iniciais de vazão e população. O caso onde a vazão real mais se aproxima do valor de projeto é na UPF, onde 10,63 m³/h representam 73% da média esperada. A vazão de operação representa 22%, 17% e 15% da vazão de projeto na UFRN, UFRGS e UFS, respectivamente.

A vazão média de esgoto doméstico pode ser estimada a partir do consumo efetivo de água, minorado em 80%, conforme a NBR 9649 e a NBR 17076 (ABNT, 1986, 2024). Nos projetos das ETES da UFRGS e da UFS, foi adotado o valor tabelado de 50 L/hab.dia para a contribuição de esgoto, enquanto uma estimativa mais precisa para uma universidade se aproxima de 10,58 L/hab.dia (Almeida; Branco, 2022). A adoção de um valor de contribuição elevado para dimensionamento explica a discrepância entre as vazões da UFS e da UPF, apesar da população similar.

No sistema da UFRGS, a vazão baixa aliada ao volume excessivo do reator resulta no tempo de detenção hidráulica (TDH) do efluente de 7,6 dias (Albornoz *et al.*, 2016); muito superior ao estimado por Sperling (2007), igual a 16 a 24 horas para lodos ativados com aeração prolongada. O mesmo ocorre na UFS, onde o TDH de projeto do reator UASB é de 6 horas e o real equivale a 2,95 dias. Além do custo investido em estruturas subutilizadas, o alto tempo de deteção implica na redução da entrada de matéria orgânica no sistema, o que pode prejudicar o desenvolvimento dos microrganismos (Oliveira, 2019).

As unidades do tratamento preliminar também são afetadas pelas estimativas de projeto,

como o espaçamento entre barras no gradeamento e as dimensões do desarenador. Na UFS, a velocidade de escoamento no desarenador está abaixo do recomendado, o que permite a sedimentação de matéria orgânica e pode levar a maus odores (Oliveira, 2019).

Outros problemas relatados derivam da infiltração de água da chuva em excesso no sistema. Conforme estudo realizado por Pereira (2021) há um aumento de 63,1% da vazão em períodos de precipitação intensa na ETE da UFRN, levantando a possibilidade de ligações clandestinas entre a rede de drenagem e a de esgoto. O autor também expõe consequências como acréscimo de demandas operacionais, transbordamento de unidades, desgaste de estruturas e sobrecarga das instalações.

A diluição do esgoto é apresentada por Rodrigues e Antunes (2021, p. 8) como provável causa para redução na eficiência do sistema da UFRGS, “[...] uma vez que diminui a concentração de nutrientes essenciais para o desenvolvimento da microbiota.” Na caracterização do esgoto, Albornoz *et al.* (2016) relatam grande variação nos parâmetros de sólidos durante as precipitações, evidenciando a possibilidade de infiltração em tubulações, conexões ou poços de visita. O lançamento indevido de águas pluviais na rede de esgoto também é uma possibilidade, confirmada na UFS pelo estudo de Arcieri (2019) no ano de sua publicação.

A frequência de limpeza das unidades do sistema revelou-se inadequada em três universidades – UFFS, UPF e UFS, tratando-se desde o gradeamento até as calhas de saída dos reatores (Ghizzi, 2015; Oliveira, 2019; Rattova, 2012).

Crizel e Lara (2020) relatam a falta de um profissional dedicado à operação e manutenção diária da ETE da UFFS, afetando a eficácia desse sistema. Pela caracterização do efluente da UPF, o estudo de Rattova (2012) destaca a necessidade de remover a espuma do reator UASB, devido à presença de óleos e graxas acima do padrão estadual de emissão em corpos hídricos (Rio Grande do Sul, 2006).

Na avaliação da UFS, Menezes e Mendonça (2017) descrevem a limpeza do desarenador como árdua e manual, visto que um único funcionário é responsável por retirar os sedimentos a uma cota de 1,70 m abaixo do solo, por baldes com capacidade de 45 kg. Oliveira (2019) também elenca outras questões operacionais, como a falta de monitoramento dos parâmetros do efluente,

manutenções sistemáticas e preventivas, operadores qualificados e a reposição dos materiais de consumo.

3.2 Parâmetros de tratamento do efluente

A Tabela 2 reúne os resultados de

caracterização do esgoto bruto de cada universidade, enquanto a Tabela 3 apresenta a análise do efluente dos sistemas de tratamento selecionados. Apesar da falta de dados disponíveis da UFRN, trata-se da única instituição com relatos de reúso de maneira efetiva.

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade do esgoto das universidades selecionadas

Parâmetros de qualidade do efluente	UFFS Chapecó	UFRGS Litoral Norte	UFS São Cristóvão	UPF Passo Fundo
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	>1,60.10 ⁵	1,54.10 ⁷	*	4,52.10 ⁶
Condutividade Elétrica (µS/cm)	*	959,6	*	*
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	226,0	267,0	*	*
DQO (mg O ₂ /L)	423,0	621,3	130,5	760,0
Relação DQO/DBO	1,87	2,33	*	*
pH	8,70	7,87	7,35	7,26
S. Totais (mg/L)	*	1020,80	358,83	*
S. Sedimentáveis (mg/L)	0,9	*	1,09	0,98
S. Suspensos Totais (mg/L)	*	311,20	54,77	437

Fonte: adaptado de Crizel e Lara (2020), Alborno (2017), Oliveira (2019), Rattova (2012).

(*): Não disponível

Tabela 3 - Parâmetros de qualidade do efluente dos sistemas de tratamento selecionados

Parâmetros de qualidade do efluente	UFFS Chapecó	UFRGS Litoral Norte	UFS São Cristóvão	UPF Passo Fundo
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	5,70.10 ⁴	3,24.10 ⁵	*	3,50.10 ⁴
Condutividade Elétrica (µS/cm)	*	725,40	*	*
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	46,0	28,40	*	71,54
Eficiência de redução de DBO ₅	77% ^a	81,6% ^a	*	*
DQO (mg O ₂ /L)	159,0	280,44	128,76	186,40
Eficiência de redução de DQO	42% ^a	60,0% ^a	2,4% ^b	*
Relação DQO/DBO	3,46	9,87	*	2,61
pH	7,80	6,31	7,50	7,37
S. Totais (mg/L)	*	528,20	380,11	*
S. Sedimentáveis (mg/L)	3,0	*	3,60	0,67
S. Suspensos Totais (mg/L)	*	69,40	55,28	76,81

Fonte: adaptado de Crizel e Lara (2020), Alborno (2017), Oliveira (2019), Goellner (2010).

(*): Não disponível

(a): Média dos dados de eficiência.

(b): Mediana dos dados de eficiência, após retirada dos outliers pelo autor

Os resultados para a DBO e a DQO no esgoto bruto da UFFS (226,0 mg/L e 423,0 mg/L, respectivamente) e da UFRGS (267,0 mg/L e 621,3 mg/L) estão de acordo com os valores típicos para esgotos domésticos de países em desenvolvimento (Sperling, 2007). Esses resultados também se assemelham aos encontrados em um estudo com 11 universidades brasileiras, em que foram obtidos os valores médios de 283,6 mg/L para DBO e 528,6 mg/L para DQO (Almeida; Branco, 2022). A relação DQO/DBO inferior a 2,4, observada tanto para a UFFS quanto para a UFRGS, indica alta biodegradabilidade da matéria orgânica presente nos esgotos, favorecendo o tratamento biológico (Sperling, 2007).

Na UPF, não há processo de desinfecção – o tratamento é finalizado após a decantação secundária. Apesar disso, os resultados de coliformes termotolerantes na saída da ETE são comparáveis às demais universidades, que empregam essa etapa. Outros resultados de caracterização incluem: $2,3 \cdot 10^4$ NMP/100mL (Bonamigo, 2014) e $1,14 \cdot 10^5$ NMP/100mL, na média de 9 coletas (Rattova, 2012).

A eficácia de métodos de desinfecção, como a cloração e a radiação UV, está diretamente ligada à presença de sólidos em suspensão no líquido. Conforme o estudo de Oliveira (2003), quanto menor a quantidade de sólidos suspensos, melhor a relação entre energia UV aplicada e efetivamente recebida. Enquanto a relação é de 1:0,9 para um efluente com média de 7,5 mgSST/L, a perda é de aproximadamente 50% para 89 mgSST/L.

A USEPA (2012) recomenda que a turbidez não ultrapasse 5 UTN e os sólidos 5 mgSST/L antes da desinfecção. Os resultados médios de Alborno (2017) no decantador secundário são de 36,20 UTN e 69,40 mgSST/L, o que sugere uma possível razão pela qual a desinfecção na ETE da UFRGS não é satisfatória.

Visando o reúso do efluente, o limite de coliformes termotolerantes no Paraná para reúso agrícola restrito é de 1.000 NMP/100mL; no Rio Grande do Sul, esse valor é de 10.000 NMP/100mL; e em Minas Gerais pode alcançar 1.000.000 NMP/100mL, desde que a fertirrigação seja localizada (Minas Gerais, 2020; Paraná, 2023; Rio Grande do Sul, 2020). Contudo, é crucial que a concentração de coliformes seja avaliada juntamente com o número de ovos de helmintos, definido como igual ou inferior a 1/L em todas as referências citadas.

As universidades UFFS, UFRGS e UPF demonstram valores de DBO₅ dentro do limite padrão nacional de lançamento em corpos hídricos, igual a 120 mg/L (Brasil, 2011). Para reúso, a USEPA (2012) estabelece valores menores, sendo 30 mg/L para uso restrito e 10 mg/L para uso irrestrito. A condição de restrição é referente ao acesso público, podendo ser controlado por meio de barreiras físicas ou normativas.

A respeito da eficiência de remoção de matéria orgânica, a UFRGS apresenta o melhor cenário. Apesar do efluente possuir a concentração exigida para o descarte em corpos hídricos, o tratamento ainda não atinge o percentual de remoção idealizado na literatura, de 90% a 97% para DBO₅ e 83% a 93% para DQO (Sperling, 2007).

A situação mais desfavorável é observada na UFS, onde Oliveira (2019) registrou valores negativos de eficiência. O autor sugere que esse cenário poderia estar relacionado à presença de limo nas calhas de saída do sistema, culminando no aporte de sólidos e matéria orgânica no efluente. O valor médio de remoção de DQO no reator UASB foi de 2,6% e máximo de 35,2%; enquanto no valo de oxidação o valor médio foi de 2,2% e máximo de 48,9%.

Avaliando-se os resultados de caracterização realizados por Alborno (2017), a relação DQO/DBO é consistentemente alta no efluente da UFRGS, indicando que há uma grande parcela inorgânica restante, a qual favorece um pós-tratamento físico-químico. A matéria inorgânica relaciona-se à condutividade elétrica, e o resultado da UFRGS, igual a 700 μ S/cm, está próximo do limite recomendado pela FAO (1985) para reúso agrícola irrestrito.

Tanto o pH quanto os sólidos sedimentáveis são relevantes ao lançamento em corpos hídricos, influenciando na vida aquática e no processo de assoreamento. A média de dados de pH revela que os efluentes estão próximos do meio neutro, o qual está inserido na faixa estabelecida pela Resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (Brasil, 2011). Enquanto a UFS e a UPF descarregam seus efluentes em cursos d'água, apenas o valor disponível para a UPF atende o limite de 1 mg/L de sólidos sedimentáveis da mesma resolução.

É essencial que a caracterização do esgoto ocorra periodicamente para identificar vulnerabilidades no sistema implantado. As propostas delineadas por diferentes autores

variam desde adaptações até a incorporação de unidades de pós-tratamento. Oliveira (2019), por exemplo, sugere na UFS a utilização de apenas

3.3 Publicações e projetos

A implantação de sistemas de tratamento em universidades pode gerar oportunidades para pesquisa e desenvolvimento tecnológico utilizando a estrutura da ETE ou seus subprodutos, como o lodo.

Ao analisar as publicações das universidades selecionadas, observa-se que o lodo de esgoto tem sido estudado como uma alternativa para diferentes aplicações além do tratamento convencional. Em estudos conduzidos na UFRN verificou-se a aplicação do lodo como adição em massa cerâmica (Lima, 2009), como constituinte de camadas de aterro após sua estabilização (Paulino, 2016) e como produtor de biogás (Cavalcanti, 2019). Além disso, tendo em vista o uso consolidado como fertilizante agrícola, Lodi (2021) avaliou a interação entre o lodo da UFFS e o imidacloprido, um inseticida amplamente utilizado no Brasil. O autor identificou uma redução gradual da toxicidade do inseticida no solo à medida que a concentração de lodo aumentava, indicando a formação de uma ação protetora sobre os organismos-alvo do inseticida.

Uma maneira de aprimorar o tratamento das ETEs instaladas para atingir padrões mais restritivos é através de novas unidades de pós-tratamento. Processos eletroquímicos, como oxidação via radicais hidroxila, oxidação mediada via cloro ativo e eletrocoagulação, foram investigados na UFRN por Moura (2014) e Silva (2016). As autoras obtiveram resultados satisfatórios na remoção de matéria orgânica pela abordagem eletroquímica, demonstrando que a tecnologia pode ser recomendada como pós-tratamento devido à sua eficiência e baixo custo operacional.

Albornoz (2017) apresenta uma proposta de eletrodialise como pós tratamento para o efluente da UFRGS, além de verificar outros parâmetros relevantes ao reúso, como cloreto, nitrato e Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). A eletrodialise é um processo que tem como objetivo a remoção de poluentes orgânicos iônicos, através da aplicação de um campo elétrico entre dois eletrodos. O autor conclui que, visando a máxima remoção de poluentes, a remoção percentual de NTK e íons pelo pós-tratamento atinge valores da ordem de 85% a 99%. Empregando-se a eletrodialise nessas condições, o efluente poderia ser usado de forma restrita ou irrestrita, em fins agrícolas, urbanos ou

um módulo UASB ou a divisão do valo de oxidação, visando equilibrar a dimensão das estruturas com a vazão reduzida de entrada.

piscicultura, desde que seja feita a correção do pH.

Na UPF, Baccarin (2011) explorou o processo físico-químico de coagulação, floculação e sedimentação para remoção de fósforo. Na maioria das condições experimentais, os coagulantes cloreto férrico e sulfato de alumínio apresentaram as maiores eficiências de remoção. Posteriormente houve uma sequência de estudos envolvendo microfiltração e ultrafiltração (Bonamigo, 2014); eletrocoagulação e ultrafiltração (Brião, 2015); e ultrafiltração e adsorção em coluna de carvão ativado granular (Pavan, 2016). Todos os autores obtiveram resultados satisfatórios, porém, com restrições para reúso variadas. O processo de ultrafiltração associada à adsorção em leitos de carvão ativado obteve o melhor desempenho, atingindo os padrões de qualidade para reúso em bacias sanitárias.

Goellner (2010) examinou o comportamento microbiológico do efluente da UPF em armazenamento – sob condições normais, em bombonas plásticas no depósito de resíduos da universidade – e na irrigação. Após 17 dias de armazenamento, a população de coliformes fecais caiu de 35.000 NMP/100ml para 190 NMP/100ml, com a falta de nutrientes sendo apontada como possível causa pelo autor. Na irrigação isolada houve uma rápida queda a partir do primeiro dia, de 21.450 NMP/100ml para 180 NMP/100ml, mantendo-se constante por 10 dias subsequentes. Nas irrigações sucessivas, o valor inicial de 362.000 NMP/100ml também diminuiu, estabilizando em 190 NMP/100ml após 10 dias.

Com base na ETE da UFRN, Nobre (2018) propôs uma prova de conceito para automatizar o sistema, por meio do desenvolvimento de circuitos e uma interface de utilização com servidor, que permitem a comunicação com a frequência de rotação dos aeradores do valo de oxidação e o medidor de vazão. Já em relação aos custos de operação e manutenção da ETE, Medeiros (2021) identificou um custo médio superior ao registrado na literatura, igual a R\$ 5,24 por metro cúbico de esgoto tratado. Por categoria, 70,27% desse valor corresponde a despesas administrativas, que consiste na remuneração bruta mensal dos funcionários lotados na ETE, e 19,39% corresponde a energia elétrica, com maior concentração de gastos nos aeradores do valo de oxidação.

O projeto Conhecendo a ETE, iniciado em 2012, tem como objetivo mostrar o funcionamento prático das unidades de tratamento de esgotos da UFRN, buscando também desmistificar o reúso do efluente. Pinheiro (2023) constatou, por meio de questionários, uma mudança na percepção ambiental e sanitária dos visitantes, mostrando a eficácia do programa como uma ferramenta de sensibilização ambiental.

Essas visitas, predominantemente realizadas pelo público interno da UFRN, ressaltam a utilização da estrutura universitária para atividades de extensão, "[...] colaborando na conexão entre teoria e prática para uma formação interdisciplinar, além de proporcionar a abordagem socioambiental de problemáticas relacionadas ao saneamento básico [...]" (Pinheiro, 2023, p. 19). Além das visitas, o projeto desenvolveu uma palestra interdisciplinar para alunos do ensino médio, em escolas públicas do município, com o objetivo de atender pelo menos 10 escolas por ano (Coelho *et al.*, 2017).

4 CONCLUSÕES

O método de tratamento mais utilizado entre as universidades selecionadas é o de lodos ativados, seja convencional, de aeração prolongada ou valo de oxidação. São sistemas que podem apresentar uma configuração compacta, permitindo sua utilização em grandes centros urbanos (ANA, 2020), embora gerem despesas mais elevadas com mecanização e manejo do lodo (Sperling, 2007). Com exceção da UFRN e da UFS, que utilizam o valo de oxidação, os demais sistemas com lodos ativados ocupam uma área entre 445,00 m² e 665,00 m², aproximadamente. A busca por essa característica pode ser atribuída à instalação dos sistemas após a fundação da instituição, onde há uma falta de espaço adequado ou competição por áreas para futuras construções acadêmicas.

Considerando-se o contexto específico de cada situação, as conclusões a seguir devem ser tomadas apenas como indicações de possíveis cenários, visto que as publicações analisadas refletem as condições de seus respectivos períodos.

É possível dizer que houve superdimensionamento nas estações da UFRN, da UFRGS e da UFS, onde a vazão de operação representa 22%, 17% e 15% da vazão de projeto, respectivamente. Além dos custos adicionais em estruturas subutilizadas, essa situação pode afetar o tratamento preliminar e biológico,

comprometendo a eficiência de unidades como gradeamento, desarenador e reatores.

Outros problemas foram relatados, como infiltração de água da chuva, frequência inadequada de limpeza e ausência de diversos fatores, como: profissionais especializados, manutenções sistemáticas e preventivas, monitoramento dos parâmetros do efluente e a reposição dos materiais de consumo.

Quanto aos resultados de caracterização do efluente tratado, os dados disponíveis para coliformes termotolerantes estão próximos, mesmo que duas, do total de três instituições, realizem tratamento terciário. É possível que a ineficiência da desinfecção esteja relacionada à alta quantidade de sólidos suspensos no efluente.

Os sistemas apresentam eficiências variadas de remoção de matéria orgânica, de 2,4% a 60%. No entanto, todos os três efluentes avaliados nesse parâmetro demonstram valores dentro do padrão nacional de lançamento em corpos hídricos.

No contexto de reúso, com base nos dados disponíveis, não é possível determinar a aptidão de cada instituição. A falta de unificação de critérios das resoluções também não favorece essa determinação. Regulamentações excessivamente restritivas podem limitar a viabilidade dessas práticas, dessa forma, é essencial promover estudos de reúso em contextos de baixo contato humano, como descargas sanitárias, fontes ornamentais e reserva para incêndio.

A contribuição dos sistemas para a comunidade acadêmica foi evidenciada por meio de estudos sobre o aproveitamento do lodo de esgoto, testes para novas unidades de pós-tratamento, análises microbiológicas do efluente, e outros. Além disso, o projeto Conhecendo a ETE destacou-se pela sensibilização ambiental e por oferecer uma abordagem interdisciplinar para questões de saneamento básico.

Em suma, embora os sistemas de tratamento tenham contribuído para a pesquisa e desenvolvimento nas instituições, foram identificados níveis variados de sucesso em suprir as necessidades locais de saneamento, revelando que ainda há espaço para aprimoramentos em termos de planejamento e execução. Essas considerações podem fornecer perspectivas valiosas para futuros projetos e iniciativas semelhantes, com o objetivo de promover uma gestão mais eficiente do tratamento de esgoto.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9649**: Projeto de redes de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17076**: Projeto de sistema de tratamento de esgoto de menor porte — Requisitos. Rio de Janeiro, 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Atlas esgotos**: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1d8cea87-3d7b-49ff-86b8-966d96c9eb01/attachments/Encarte_AtlasEsgotos.pdf. Acesso em: 28 nov. 2023.
- ALBORNOZ, L. L. **Estudo de caso**: avaliação da eficiência de uma estação de tratamento de efluentes de um campus universitário. 2015. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127733>. Acesso em: 2 nov. 2023.
- ALBORNOZ, L. L. **Eletrodialise como tratamento terciário em uma estação de tratamento de efluentes de um Campus Universitário visando o reúso de água**. 2017. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/158235>. Acesso em: 2 nov. 2023.
- ALBORNOZ, L. L.; BERNARDES, A. M.; TESSARO, I. C.; CENTURIÃO, T. C.; MENDES, C. A. B. Monitoramento, caracterização e avaliação da eficiência de remoção de poluentes em uma estação compacta de tratamento de efluentes. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 10, 2016, Porto Alegre. **Anais Eletrônicos [...]**. Porto Alegre: ABES, 2016. Disponível em: <<https://www.abes-rs.org.br/site/eventoDetalhe.php?eventoid=58>>. Acesso em 01 nov. 2023.
- ALEM SOBRINHO, P.; TSUTIYA, M. T. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 2 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.
- ALMEIDA, V. de; BRANCO, J. **Proposta de tratamento e reúso do esgoto sanitário do Campus Uvaranas da UEPG**. 2022. 128f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022. Disponível em: <https://ri.uepg.br/monografias/handle/123456789/144?show=full>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23rd ed. Washington, DC: APHA, 2017. Disponível em: <https://www.standardmethods.org/doi/book/10.2105/SMWW.2882>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- ARCIERI, M. R. A. **Sistema de coleta e transporte de esgoto da Universidade Federal de Sergipe**: influência das águas pluviais na vazão do sistema. 2019. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/15873>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- BACCARIN, L. I. P. **Pós-tratamento físico-químico de efluente sanitário para remoção de fósforo**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia; Área de Concentração em Infraestrutura e Meio Ambiente) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/273>. Acesso em: 6 dez. 2024.
- BONAMIGO, M. A. **Microfiltração e ultrafiltração para pós tratamento de esgoto para reúso doméstico não potável**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/308>. Acesso em: 6 dez. 2024.

BRASIL. Lei n.º 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 23 dez. 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso em: 21 nov. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 28 nov. 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 121 de 16 de dezembro de 2010. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, 16 dez. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores. **Diário Oficial da União**, Brasília, 16 maio 2011.

BRIÃO, E. B. **Eletrocoagulação seguida de ultrafiltração para pós-tratamento de esgoto para reuso doméstico não potável**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/1498>. Acesso em: 6 dez. 2024.

CAVALCANTI, O. E. R. **Avaliação da produção de biogás a partir da digestão de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) da UFRN**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química do Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38394>. Acesso em: 2 nov. 2023.

COELHO, J. F. R.; FERRAZ, F. de O. S. M.; GARRIDO, J. W. A.; TERRA, I. Conhecendo a

estação de tratamento de esgotos da UFRN: uma proposta de educação sanitária e ambiental em escolas públicas de Natal/RN. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO, IV, 2017, João Pessoa. **Anais Eletrônicos [...]**. Campina Grande: Realize Editora, 2017. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/36230>. Acesso em 01 nov. 2023.

CRIZEL, M. G.; LARA, A. C. Avaliação da eficiência de uma estação de tratamento de efluentes instalada em uma universidade federal: questão de gestão ambiental. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 3, p. 54-70, jul. 2020. Disponível em: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/379>. Acesso em: 6 dez. 2024.

DIAS, D. F. C.; PASSOS, R. G.; SPERLING, M von. A review of bacterial indicator disinfection mechanisms in waste stabilisation ponds. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 16, n. 3, p. 517-539, mai. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317139129_A_review_of_bacterial_indicator_disinfection_mechanisms_in_waste_stabilisation_ponds. Acesso em: 6 dez. 2024.

ESLAMIAN, S. (ed.). **Urban Water Reuse Handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19646>.

FIBRATEC. **Tratamento de Efluentes**. Disponível em: <https://fibratec.com.br/produto/estacao-de-tratamento-aerada-customizavel/>. Acesso em: 26 dez. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAO Irrigation and Drainage Paper**, 29 Rev. 1. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. Disponível em: <https://www.fao.org/4/t0234e/t0234e00.htm>. Acesso em: 6 dez. 2024.

GAMA, K. R. de A.; RÉGO, A. T. A. do; COSTA, J. D. da; VALONES, G. Gestão do tratamento de esgotos sanitários produzidos em universidades públicas federais no Nordeste do Brasil. **GEAMA**, Ciências Ambientais e Biotecnologia. v. 6, n. 3, p. 4-14, dez. 2020. Disponível em:

<https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/2865/482483830>. Acesso em: 17 nov. 2023.

GHIZZU, H. P. **Da gestão ao sistema**: estudo de caso na Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Chapecó. 2015. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2015.

GOELLNER, E. **Estudo para reúso de efluentes de estações de tratamento de esgoto na irrigação**. 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Área de Concentração em Infraestrutura e Meio Ambiente) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/bitstream/tede/263/1/2010EmanuelGoellner.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2024.

GONÇALVES, R. F. (coord.). **Desinfecção de Efluentes Sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-efinanciamento/historico-de-programas/prosab/ProsabRicardo.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2023.

GOOGLE. **Google Earth**. Disponível em: <<http://earth.google.com>>. Acesso em: 1 nov. 2023.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KUMJAROEN, T.; CHIEMCHAI SRI, W.; CHIEMCHAI SRI, C. Colonization of Microbial Biofilms in Pipeline of Water Reuse. **Environmental Engineering Research**, v. 19, n. 3, p. 275-281, set. 2014. Disponível em: <https://www.eeer.org/journal/view.php?number=660>. Acesso em: 24 nov. 2023.

LIMA, A. D. de. **Análise da adição de resíduo oriundo do tratamento de esgotos em massa cerâmica utilizada para fabricação de telhas**. 2009. 124 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental, Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Hidráulica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. Disponível em:

<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15953>. Acesso em: 6 dez. 2024.

LIMA, M.; ARAÚJO, B. M. de; SOARES, S. R. A.; SANTOS, A. S. P.; VIEIRA, J. M. P. Water reuse potential for irrigation in Brazilian hydrographic regions. **Water Supply**, v. 21, n. 6, p. 2799–2810, set. 2021. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/21/6/2799/77798/Water-reuse-potential-for-irrigation-in-Brazilian>. Acesso em: 23 nov. 2023.

LODI, M. R. **Efeito da aplicação de lodo de estação de tratamento de esgoto no solo sobre a toxicidade do imidacloprido para folsomia candida**. 2021. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2021.

MEDEIROS, G. de S. **Análise dos custos operacionais de uma estação de tratamento de esgoto de instituição federal de ensino superior**. 2021. 30f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/37371>. Acesso em: 6 dez. 2024.

MENEZES, I. S. de; MENDONÇA, L. C. Avaliação do tratamento preliminar da estação de tratamento de efluentes do campus de São Cristóvão da Universidade Federal de Sergipe. **Scientia Plena**, v. 13, n. 10, p. 1-7, set. 2017. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/3752>. Acesso em: 6 dez. 2024.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. Tradução: Ivanildo Hespagnol, José Carlos Mierzwa. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Deliberação Normativa nº 65 de 18 de junho de 2020. Estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) de sistemas públicos e privados e dá outras providências. **Diário Oficial Executivo**, Minas Gerais, 18 jun. 2020.

MOURA, D. C. de. **Aplicação de tecnologias eletroquímicas (oxidação via radicais hidroxila, oxidação mediada via cloro ativo e eletrocoagulação) para o tratamento de efluentes reais ou sintéticos.** 2014. 120f. Tese (Doutorado em Química) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/19803>. Acesso em: 6 dez. 2024.

NOBRE, L. R. **Prova de conceito para o sistema de automação da Estações de Tratamento de Esgoto da UFRN.** 2018. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/43611>. Acesso em: 6 dez. 2024.

OLIVEIRA, E. C. M. de. **Desinfecção de efluentes sanitários tratados através da radiação ultravioleta.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84539>. Acesso em: 6 dez. 2024.

OLIVEIRA, G.; SCAZUFCA, P.; SAYON, P. L. **Ranking do Saneamento do Instituto Trata Brasil de 2023 (SNIS 2021).** Go Associados. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2023/>. Acesso em: 17 nov. 2023.

OLIVEIRA, S. S. **Avaliação operacional de uma estação de tratamento de esgotos em uma universidade pública.** 2019. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/17229>. Acesso em: 6 dez. 2024.

PARANÁ. Secretaria do Desenvolvimento Sustentável. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Resolução nº 122 de 19 de junho de 2023. Estabelece diretrizes e critérios gerais para reuso de água no Estado do Paraná. **Diário Oficial Executivo**, Curitiba, 28 jun. 2023, p. 12.

PAULINO, R. M. **Estudo geotécnico do uso de lodo de esgoto higienizado em camadas de cobertura de aterros sanitários.** 2016. 15f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40825>. Acesso em: 6 dez. 2024.

PAVAN, M. M. **Pós-tratamento de efluente de instituição de ensino superior por ultrafiltração e adsorção para reúso.** 2016. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/1418>. Acesso em: 6 dez. 2024.

PEREIRA, J. de M. **Influência da água pluvial na ETE do campus central da UFRN.** 2021. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/37147>. Acesso em: 6 dez. 2024.

PINHEIRO, A. C. A. **Visitação à estação de tratamento de esgotos do campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como ferramenta de educação ambiental e sanitária.** 2023. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53051>. Acesso em: 6 dez. 2024.

RATTOVA, D. F. **Análise do desempenho da estação de tratamento de efluentes do Campus I da Universidade de Passo Fundo.** 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/321>. Acesso em: 6 dez. 2024.

REN, X.; ZHANG, S.; WU, M.; XIAO, B.; MIAO, H.; CHEN, H. Effect and influence mechanism of biofilm formation on the biological stability of

reclaimed water. **Science of the Total Environment**, v. 906, jan. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723063623>. Acesso em: 5 jan. 2024.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução nº 128 de 24 de novembro de 2006. Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial Executivo**, Rio Grande do Sul, 24 nov. 2006.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução nº 419 de 13 de fevereiro de 2020. Estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial Executivo**, Rio Grande do Sul, 13 fev. 2020.

RODRIGUES, E. A.; ANTUNES, G. R. Avaliação da eficiência de uma estação de tratamento de efluentes compacta de um campus universitário. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31º, 2021, Curitiba. **Anais Eletrônicos [...]**. Curitiba: ABES, 2021. Disponível em: <https://icongresso.abes-dn.itarget.com.br/anais/index/index/cc/9>. Acesso em 01 nov. 2023.

SANTOS, A. B. dos; MOTA FILHO, C. R. Nota Técnica 1: Tópicos de interesse. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.2, n.3, p. 5-14, jul./set. 2022. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/pdf/ESA_NT_V2n3_DOI_compressed.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2023.

SILVA, A. C. C. da. **Descontaminação do efluente da ETE-UFRN via abordagem eletroquímica: avaliação da eficiência e toxicidade**. 2016. 61f. Trabalho de Conclusão de

Curso (Graduação em Química do Petróleo) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38382>. Acesso em: 6 dez. 2024.

SOUZA, B. S.; AMAZONAS, C. S. de A.; TORRES, N. H.; FERREIRA, L. F. R. Proposta de um indicador de salubridade ambiental (ISA) para análise do saneamento no campus da Universidade Federal de Sergipe-São Cristóvão, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. 1-13, jan./2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/11515/10289/152886>. Acesso em: 6 dez. 2024.

SPERLING, M. von. **Wastewater characteristics, treatment and disposal**. Biological Wastewater Treatment Series, v. 1. London: IWA publishing, 2007.

TAUCHEN, J.; BRANDLI, L.L. A gestão ambiental em instituições de ensino superior: modelo para a implantação em campus universitário. **Gestão e Produção**, São Paulo, v.13, n.3, p. 503-515, set./dez. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/FPS4f4wWJHxPRpw4BcW33Gx/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 nov. 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Guidelines for water reuse**. 2nd ed. Washington DC: USEPA, 2012. Report n.º. EPA/600/R-12/618. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-gui_delines-water-reuse.pdf. Acesso em: 21 nov. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Wastewater use in agriculture, v 2. Geneva: WHO, 2006. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9241546832>. Acesso em: 22 nov. 2023.