



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Rayssa Vogeler Berquó Jacob

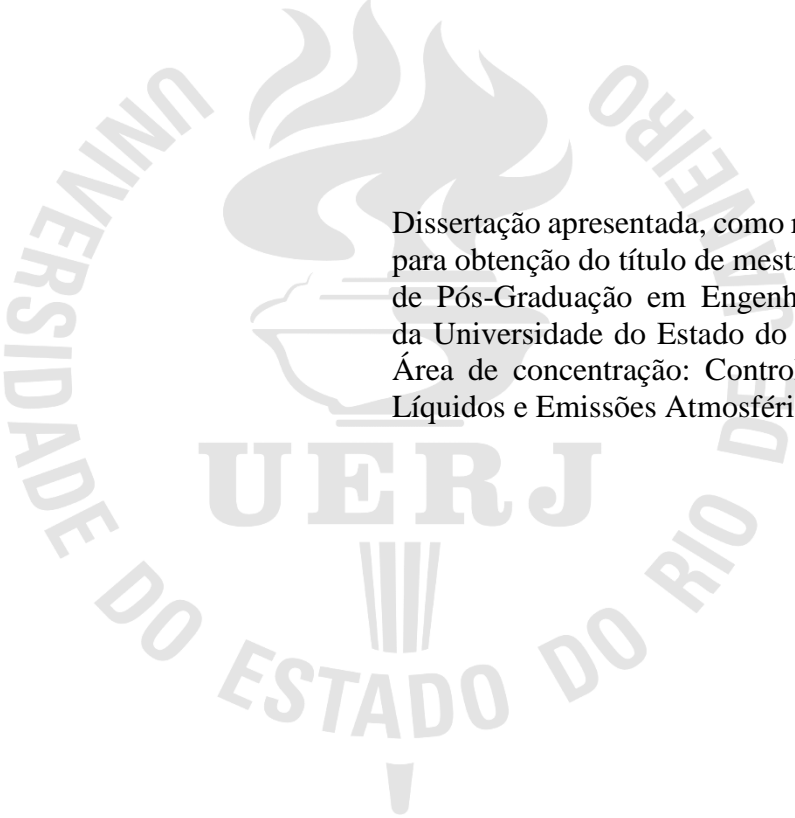
**Avaliação técnica-operacional e monitoramento de um sistema
descentralizado de tratamento de esgotos domésticos como proposta de
reúso de água em áreas isoladas**

Rio de Janeiro

2023

Rayssa Vogeler Berquó Jacob

Avaliação técnica-operacional e monitoramento de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos como proposta de reúso de água em áreas isoladas



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle de Efluentes Líquidos e Emissões Atmosféricas.

Orientador: Prof. Dr. André Luís de Sá Salomão

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a. Ana Silvia Pereira Santos

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

J15	Jacob, Rayssa Vogeler Berquó. Avaliação técnica-operacional e monitoramento de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos como proposta de reúso de água em áreas isoladas / Rayssa Vogeler Berquó Jacob. – 2023. 97 f. Orientador: André Luís de Sá Salomão. Coorientadora: Ana Silvia Pereira Santos. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. 1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Serviços ambientais - Teses. 3. Água - Purificação - Teses. 4. Água - Reuso - Teses. I. Salomão, André Luís de Sá. II. Santos, Ana Silvia Pereira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título. CDU 628.161
-----	---

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Rayssa Vogeler Berquó Jacob

Avaliação técnica-operacional e monitoramento de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos como proposta de reúso de água em áreas isoladas

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle de Efluentes Líquidos e Emissões Atmosféricas.

Aprovada em 17 de março de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luís de Sá Salomão (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dra. Ana Silvia Pereira Santos (Coorientadora)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dra. Anna Virgínia Muniz Machado
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Leonardo Duarte Batista da Silva
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Prof.^a Dra. Alena Torres Netto
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido pai, Adil Motta Jacob (*in memoriam*), à minha mãe, Katia Vogeler da Silva Berquó, aos meus amigos e familiares que sempre me incentivaram e à Deus por ter me dado toda a sabedoria e força para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, à Deus pela sua infinita misericórdia ao me permitir vivenciar mais essa fase tão frutífera. Louvo também pela presença acolhedora da Virgem Maria, que me deu o seu colo em tantos momentos de aflição.

À minha família, meu pai Adil Motta Jacob (*in memoriam*) e à minha mãe, Katia Vogeler da Silva Berquó, ao meu parceiro, Vitor Moraes de Andrade, meus irmãos, sobrinhos e tias por toda a torcida e compreensão.

Aos meus amigos da Paróquia Santo Afonso, que foram meus intercessores para enfrentar essa jornada e foram o reflexo do Amor de Deus na minha vida. Em especial, ao Padre André, as minhas meninas Gabi, Marcella, Grazi, Karina, Juliana e Amanda e ao meu grupo da Pastoral Social.

Aos meus colegas do trabalho e meus chefes por terem me ajudado a conciliar a jornada dupla e sempre me incentivarem. Agradeço também, aos voluntários do JPS Rio, da ABES, do SJWP e da CT Saneamento Rural que me ensinaram tanto sobre colaboração e o potencial jovem.

A todos os professores da UERJ, colaboradores do CEADS, membros do BIOTEMA, técnicos do LABIFI, LES, PEAMB, DESMA que foram essenciais para que este momento se tornasse mais leve, com vocês o caminho ficou mais florido.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. André Salomão e Profa. Dra. Ana Silvia por terem sido tão generosos comigo, compartilhando seus conhecimentos e me incentivando sempre. Vocês são inspirações para mim!

Por fim, agradeço a UERJ, essa gigante de concreto que mais uma vez me acolheu e ensinou como a educação pública pode mudar vidas. Espero poder ser uma filha acadêmica que responda com profissionalismo a tantas mazelas sociais e ambientais do nosso país.

Nada temas, não serás desapontada.

Isaías 54,4

RESUMO

JACOB, Rayssa Vogeler Berquó. *Monitoramento de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos com propostas de reúso de água em áreas isoladas*. 2023. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A falta da oferta de serviços de esgotamento sanitário é uma problemática socioambiental que assola de forma ainda mais intensa as populações das áreas isoladas, que precisam aplicar alternativas descentralizadas para ter o tratamento do esgoto. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos, denominado Ecossistema Engenheirado (EE), instalado no CEADS da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) localizado na Ilha Grande – RJ para disposição final adequada e/ou aproveitamento do efluente tratado. O EE foi composto por tratamento convencional, com caixa de gordura + tanque séptico + filtro aerado submerso + biofiltro misto combinado com soluções baseadas na natureza, compostas por 3 *wetlands* construídos (*E. crassipe*, *T. domingensis*, gramíneas) e um tanque de algas, com capacidade de tratamento de 1440 L dia⁻¹, em uma área total de 25 m². O sistema foi operado e monitorado em 3 fases (partida do sistema, fase I e fase II de operação) no período de fevereiro/22 a fevereiro/23, tendo sido realizadas 10 campanhas para avaliar a eficiência de tratamento de parâmetros físico-químicos (pH, OD, DBO, DQO, Temperatura, Turbidez, CE, SST, SDT, SSed, Amônia, Nitrito, Nitrato e Fósforo) e microbiológico (Coliformes Termotolerantes) visando atender aos padrões de lançamento de efluentes líquidos da Normativa do Rio de Janeiro - NOP INEA nº 45/2021. Ainda, foram avaliados a contribuição da remoção de cargas orgânicas e de nutrientes pela biomassa das macrófitas e o potencial para remoção de poluentes emergentes, entre fármacos, hormônios e aditivos plásticos. Os resultados indicaram boa eficiência na remoção de compostos orgânicos, tendo um efluente final com concentração média de DBO de 57,2 mg L⁻¹ (74% de eficiência de remoção), 13 mg L⁻¹ de SST (90%), atendendo a legislação vigente. No entanto, a remoção de nutrientes não foi tão satisfatória, apresentando um efluente final com concentração de 41,4 mg L⁻¹ de Amônia e 16,20 mg L⁻¹ de fósforo, sendo necessário um ajuste no EE para melhorias nas rotas de remoção destes compostos. A remoção de coliformes termotolerantes foi de 99,9%, 91,9 % e 42,5% em diferentes coletas na saída do tratamento. A taxa média de crescimento de biomassa das macrófitas foi de 24,12 g m⁻² dia⁻¹, com absorção total de 10,41 g C m⁻² dia⁻¹, 1,01 g N m⁻² dia⁻¹, 0,15 g P m⁻² dia⁻¹. Os compostos emergentes apresentaram uma redução na área do pico cromatográfico de 32-99%. No entanto, o efluente final ainda apresenta toxicidade crônica para microalgas. As propostas para reúso de água foram para aplicações de uso restrito, devido a qualidade do efluente final gerado, sendo recomendada a aplicação de algumas barreiras para permitir maior viabilidade da prática. Pode-se concluir, que o modelo do EE é uma alternativa promissora para alcançar a universalização do saneamento em áreas isoladas, tendo em vista que é um sistema com boa eficiência de tratamento, baixo consumo de energia, simples operação, baixa manutenção e tem alta resiliência. Para aumento da eficiência de tratamento, recomendam-se alguns ajustes, como a implantação de painéis fotovoltaicos, a fim de dar mais autonomia de energia elétrica para manter a aeração constante do sistema.

Palavras-chave: Saneamento Rural. Efluente doméstico. Wetlands Construídos. Região insular.
Sistema compacto de tratamento de esgotos.

ABSTRACT

JACOB, Rayssa Vogeler Berquó. *Monitoring of a decentralized domestic sewage treatment system with proposals for water reuse in isolated areas*. 2023. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The lack of supply of sanitary sewage services is a socio-environmental problem that affects even more intensely the populations of isolated areas, who need to apply decentralized alternatives to have sewage treatment. The aim of the study was to evaluate the performance of the decentralized domestic wastewater treatment system - Engineered Ecosystem (EE), installed at the CEADS of the Rio de Janeiro State University (UERJ) in Ilha Grande – Rio de Janeiro for proper final disposal and/or use of treated effluent. The EE is formed by the combination of conventional treatment, such as grease trap, septic tank, submerged aerated filter and mixed biofilter, with the biotechnology of 3 constructed wetlands (*E. crassipe*, *T. domingensis*, grasses) and algae tank, with a treatment capacity of 1440 Lday⁻¹ occupying a total area of 25 m². The system was operated and monitored in 3 phases (system startup, phase I and phase II of operation) from February/22 to February/23, with 10 campaigns being carried out to evaluate the efficiency of treatment of physical-chemical parameters (pH, DO, BOD, COD, Temperature, Turbidity, EC, TSS, TDS, SedS, Ammonia, Nitrite, Nitrate and Phosphorus) and microbiological (Thermotolerant Coliforms) in order to meet the standards for the release of liquid effluents of the Rio de Janeiro Regulation - NOP INEA n° 45/2021. Also, were evaluated the contribution of removal of organic loads and nutrients by macrophyte biomass and the potential for removal of emerging pollutants, including drugs, hormones, and plastic additives. The results indicated good efficiency in the removal of organic compounds, with a final effluent with an average concentration of BOD of 57.2 mg L⁻¹ (74% removal efficiency), 13 mg L⁻¹ of TSS (90%), meeting the current legislation. However, the removal of nutrients was not so satisfactory, presenting a final effluent with a concentration of 41.4 mg L⁻¹ of Ammonia and 16.20 mg L⁻¹ of phosphorus, requiring an adjustment in the EE for improvements in the routes of removal of these compounds. The removal of thermotolerant coliforms was 99.9%, 91.9% and 42.5% in different campaigns at the end of treatment. The average growth rate of macrophyte biomass was 24.12 g m⁻² day⁻¹, with a total absorption of 10.41 g C m⁻² day⁻¹, 1.01 g N m⁻² day⁻¹, 0.15 g P m⁻² day⁻¹. The emerging compounds showed a reduction in chromatographic peak area of 32-99%. However, the final effluent still presents chronic toxicity for microalgae. The proposals for water reuse were for restricted use applications, due to the quality of the final effluent generated, and the application of some barriers was recommended to allow greater viability of the practice. According to our results, the EE model is a viable alternative to universalize access to domestic wastewater treatment in isolated communities, being a treatment efficiency, low energy consumption, simple operation, low maintenance and high resilience. Toward to increase treatment efficiency, some adjustments are recommended, such as the installation of photovoltaic panels, to provide more electricity autonomy.

Keywords: Rural Sanitation. Domestic effluent. Constructed Wetlands. Island region. Compact Sewage treatment system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização do processo de Revisão Sistemática da Literatura descrita na metodologia.	24
Figura 2 – Esquema do processo de busca e seleção dos trabalhos.	26
Figura 3 - Distribuição anual das publicações sobre reúso de água em áreas isoladas no período de 2002 a 2022.....	27
Figura 4 - Distribuição espacial e tipos de reúso de água durante o período de 2002 a 2022 em sistemas descentralizados de tratamento de esgotos domésticos nas áreas rurais encontradas na revisão sistemática da literatura.....	29
Figura 5 - Mapa de localização do CEADS na Vila Dois Rios, Ilha Grande – RJ.....	42
Figura 6 - Representação gráfica do Ecossistema Engenheirado – tratamento descentralizado de esgoto doméstico na Vila Dois Rios, Ilha Grande – RJ.....	43
Figura 7 - Fotografias do Ecossistema Engenheirado: (A) tratamento convencional, (B) Vista frontal do sistema e (C) Tratamento ecológico.	44
Figura 8 - Representação da linha 1- tratamento convencional com a presença das unidades responsáveis pelo controle da vazão.....	45
Figura 9 - Caixa de Gordura do EE: (A) Vista externa e (B) vista por dentro com detalhe da gordura.....	46
Figura 10 - Tanque Séptico do EE: (A) Vista externa e (B) Vista por dentro com detalhe para espuma na camada superior do tanque.	47
Figura 11 - Representação gráfica do tratamento primário do EE: caixa de gordura e tanque séptico.....	47
Figura 12 - Fotografia do leito de secagem instalado no CEADS.....	48
Figura 13 - Filtro Aerado Submerso do EE: (A)Vista externa com a bomba de ar e (B)Vista por dentro com detalhe da formação das bolhas de ar.	49
Figura 14 - Biofiltro Misto do EE: (A) Vista externa e (B) Vista por dentro com detalhe do meio filtrante (argila expandida).	50
Figura 15 - Representação gráfica do tratamento secundário do EE: filtro aerado submerso e biofiltro misto.	50
Figura 16 - WC de Aguapé do EE.....	51
Figura 17 - Tanque de Algas do EE.	51

Figura 18 -WC de Taboa do EE.	52
Figura 19 - WC de Gramíneas do EE.	52
Figura 20 - Representação gráfica do tratamento terciário do EE: WC de Aguapé + TA + WC de Taboa + WC de Gramíneas.....	52
Figura 21 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.....	53
Figura 22 – Manutenção Geral do EE: (A) Retirada de metade do Aguapé do WC1; (B) Poda da Taboa do WC2; (C) Poda das gramíneas do WC3 e (D) Manutenção da caixa de gordura.	56
Figura 23 - Sondas utilizadas na pesquisa: (A) Sonda multiparamétrica da Horiba - U-50 e (B) Sonda de OD da Hach – HQ3d.....	58
Figura 24 - Análises realizadas nos laboratórios do CEADS e da UERJ (LABIFI): (A) Tubos das análises de nutrientes (amônia, nitrito, nitrato e fósforo), (B) Digestor para DQO, (C) Preparação das análises de nutrientes e (D) Aparatados de filtração para a análise de SST....	58
Figura 25 - Avaliação da biomassa produzida nos WCs e no TA.....	59
Figura 26 - Fotografias das reformas para partida do Ecosistema Engenheirado. (A) Remoção das plantas invasoras e troca das tubulações quebradas com uma noção do antes e depois; (B) Reposição da Taboa e adição de brita no WC2; (C) Sistema pintado e com a nova caixa de gordura.....	60
Figura 27 - Reparos feitos no Filtro Aerado Submerso. (A) Estrutura de Mangueiras porosas; (B) Mídias plásticas; (C) Tanque em pleno funcionamento.....	62
Figura 28 - Substituição do tanque pulmão do EE e da caixa de gordura do CEADS. (A) Nova caixa de gordura do CEADS fechada; (B) Nova caixa de gordura do CEADS aberta; (C) Em azul, novo tanque pulmão.....	63
Figura 29 - Instalação da Caixa de Areia. (A) Processo de montagem e aproveitamento da areia de uma antiga caixa de areia e (B) Nova caixa de areia instalada.....	63
Figura 30 - Manejo e disposição final do lodo do tanque séptico. (A) Retirada do lodo do tanque séptico com auxílio de uma peneira; (B) e (C) Disposição final do lodo no leito de secagem.	64
Figura 31 – Gráfico de DBO de cada unidade de tratamento: (A) Entrada e saída do efluente, (B) Linha 1 e (C) Linha 2.	71
Figura 32 - Gráfico de SST de cada unidade de tratamento: (A) Entrada e saída do efluente, (B) Linha 1 e (C) Linha 2.	72
Figura 33 - Gráfico de (A) Amônia, (B) Nitrito e (C) Nitrato das unidades BR, FAZ, BFM, TA e WC3.....	74

Figura 34 - Gráfico com a contagem de algas no ensaio de toxicidade crônica no EB e WC3. (A) Campanha de Dezembro/2022 e (B) Campanha de Janeiro/2023.	79
Figura 35 - Remoção de hormônios EE: (A) 17a ethinilestradiol (B) levonorgestrel (C) 17b estradiol (D) estrona.	80
Figura 36 - Remoção de fármacos no EE: (A) Sulfametoxazol, (B) Trimetropim, (C) Ibuprofeno, (D) Carbamazepina.....	81
Figura 37 - Remoção de aditivos plásticos no EE: (A) Benzofenona, (B) Dietilftalato, (C) Bisfenol A, (D) Bisfenol S.	82
Figura 38 – Capa (A) e contracapa (B) do manual do EE.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões das unidades de tratamento que compõe o Ecossistema Engenheirado.	44
Tabela 2 - Desempenho do Ecossistema Engenheirado por parâmetros analisados de julho/22 a fevereiro/23 (C1 à C10)......	65
Tabela 3 - Balanço de massa (C, N e P) dos Wetlands Construídos (WC) e Tanque de Algas (TA) do EE.	77
Tabela 4 - Qualidade do efluente final do EE nas coletas 7, 8 e 10.	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tecnologias descentralizadas de tratamento do esgoto domésticos e suas aplicações de reúso encontradas na RSL.....	31
Quadro 2 - Diretrizes com os critérios de qualidade para reúso de água encontrados nos trabalhos analisados.....	33
Quadro 3 - Principais documentos reguladores com padrões e aspectos mais relevantes para aplicação de reúso de água nos diferentes estados do Brasil.....	35
Quadro 4 - Condições de lançamento de efluentes líquidos em corpos receptores definidos pela NOP-INEA nº 45/2021.....	39

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1. OBJETIVOS	19
1.1. Objetivo Geral	19
1.2. Objetivos Específicos	19
1.3. Estrutura do Trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Revisão Sistemática da Literatura	21
2.2. Aspectos legais nacionais.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. Local de estudo	41
3.2. Ecosistema Engenheirado (EE)	42
3.2.1. <u>Etapa Preliminar</u>	45
3.2.2. <u>Tratamento Primário</u>	46
3.2.3. <u>Tratamento Secundário</u>	48
3.2.4. <u>Tratamento Terciário</u>	51
3.3. Procedimento Experimental	53
3.3.1. <u>Partida do sistema</u>	54
3.3.2. <u>Fases I e II de Operação</u>	54
3.3.3. <u>Gestão Operacional do EE</u>	55
3.3.4. <u>Monitoramento do sistema</u>	56
3.3.4.1. <u>Biomassa Seca</u>	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1. Partida do sistema	60
4.2. Fase I de operação	61
4.3. Fase II de operação.....	64
4.4. Desempenho do Ecosistema Engenheirado	65
4.5. Propostas de reúso	82
4.6. Manual do Ecosistema Engenheirado	85
5. CONCLUSÕES	86
6. RECOMENDAÇÕES	88

REFERÊNCIAS	89
PRODUTIVIDADE ACADÊMICA.....	97

INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2020, 46% da população global (3,5 bilhões de pessoas) não tinha acesso a serviços de saneamento seguros, enquanto mais de 1,7 bilhão de pessoas careciam de instalações sanitárias apropriadas, como banheiros ou latrinas particulares e destes, 494 milhões de pessoas ainda defecavam ao ar livre (OMS, 2020). Também foi reportado pela OMS (2020) que 45% das águas residuais domésticas geradas globalmente vêm sendo descartadas sem tratamento adequado e estima-se que pelo menos 10% da população mundial consuma alimentos irrigados por águas residuais sem tratamento adequado.

A falta de saneamento, além de provocar a degradação ambiental, está diretamente ligada à transmissão de doenças. Cerca de 839.000 pessoas em países de baixa e média renda morrem anualmente devido à falta de água, saneamento e higiene, representando 60% do total de mortes por diarreia no mundo (OMS, 2020).

A situação do saneamento no Brasil é bem semelhante à de outros países em desenvolvimento. Segundo ANA (2020), o Brasil apresenta índices insatisfatórios em relação ao saneamento, de forma centralizada, somente 46,5% da população é atendida com coleta e tratamento de esgoto doméstico, enquanto 53,5% não possui esses serviços de forma satisfatória. Em relação aos sistemas individuais, de forma descentralizada, os dados apresentam a seguinte situação: 12,3% com fossa séptica e sumidouro, 20,1% com fossa rudimentar e 7,8% da população sem tratamento.

Dados retirados do Painel de Saneamento Brasil (2020) revelam que em 2020, cerca de 79.100 pessoas foram internadas e 900 pessoas vieram a óbito por doenças de veiculação hídrica, no Brasil. Além do impacto à saúde, o lançamento de esgotos sem tratamento no meio ambiente compromete a qualidade da água e seus usos múltiplos. De acordo com ANA (2017), mais de 110.000 km de trechos de rios estão com qualidade comprometida devido ao excesso de carga orgânica que vem sendo lançada.

Os investimentos em ações de saneamento no Brasil são limitados e não alcançam a universalização dos serviços; em relação ao esgotamento sanitário, o atendimento concentra-se nos grandes centros urbanos, devido à pressão por parte da sociedade e economia de escala (FERREIRA, 2016). Historicamente, as populações das regiões isoladas (áreas rurais e periurbanas) ficam à margem de serviços de qualidade, carecendo

de ações públicas essenciais para a garantia do saneamento, como coleta e tratamento dos efluentes domésticos (BRASIL, 2019).

De acordo com o IBGE (2010), 79% dos municípios brasileiros têm uma população menor ou igual a 50.000 habitantes e as áreas rurais equivalem a 21% de toda a população brasileira (cerca de 26 milhões de pessoas). O Programa Nacional de Saneamento Rural – PNSR, aponta que 20% da população rural no Brasil têm atendimento adequado dos serviços de esgotamento sanitário e cerca de 80% não têm atendimento satisfatório (BRASIL, 2019), apresentando um déficit ainda maior quando comparado com as áreas urbanas.

O Marco Legal do Saneamento, a Lei Federal nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020), propõe a adoção de mecanismos para “garantia de meios adequados para o atendimento da população rural, por meio da utilização de soluções compatíveis com as suas características econômicas e sociais peculiares”, como possibilidade para mudar a precariedade nas áreas rurais.

A OMS (2020) considera um serviço de esgotamento sanitário seguro e adequado quando os aparelhos sanitários não são compartilhados com pessoas de diferentes moradias, os efluentes são tratados diretamente no local onde foram gerados (sistemas descentralizados) ou são coletados e encaminhados para uma estação de tratamento (sistemas centralizados). De acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) no Brasil, um serviço adequado de esgotamento sanitário inclui coleta, seguida de tratamento em estação de tratamento de efluentes ou na utilização de fossa séptica seguida de pós-tratamento (BRASIL, 2013).

O sistema de esgotamento sanitário tem sido, tradicionalmente, baseado em sistemas de tratamento centralizados (STC), nos quais há uma rede de coleta de esgotos que transporta os efluentes até uma grande instalação para o seu tratamento – estação de tratamento de esgoto (ETE) (USEPA, 2005). Em geral, os sistemas centralizados são financeiramente atraentes para regiões onde a população e a área favorecem a economia de escala (CAPODAGLIO et al. 2017). Os principais custos estão relacionados às extensas tubulações de coleta e transporte, que podem representar até 60% do orçamento total (VON SPERLING & SALAZAR, 2013).

Diversos estudos têm mostrado que o déficit nos serviços de saneamento, principalmente na parte de coleta e tratamento de esgotos domésticos, concentra-se em países em desenvolvimento, áreas rurais, periurbanas e assentamento informais

(MASSOUD et al., 2009; UNESCO, 2019, BRASIL, 2020). Isso demonstra que depender somente dos sistemas centralizados para a gestão sustentável do tratamento de efluentes é inadequado, pois muitas vezes esse modelo não se mostra atrativo para as regiões isoladas. Portanto, adotar novas estratégias para aumentar a cobertura dos serviços de esgotamento sanitário é necessário (CAPODAGLIO et al. 2017). Com isso, o estudo e o desenvolvimento de sistemas descentralizados de tratamento de esgotos domésticos têm grande relevância, tendo em vista que essa é uma alternativa que pode contribuir para o acesso aos serviços de tratamento de esgotos nessas regiões (HONORATO et al., 2021).

Nos sistemas de tratamento descentralizado (STD), o efluente é coletado, tratado e descartado (ou utilizado) próximo ao local onde foi gerado (SUBTIL et al., 2016). Tais sistemas são preferencialmente adotados em comunidades isoladas, com baixa densidade demográfica e, de maneira geral, são mais econômicos do que os sistemas centralizados (USEPA, 2005). O STD consiste em sistemas modulares em um amplo aspecto de escalas, desde modelos individuais até sistemas do tipo aglomerados para tratamento em edifícios (MASSOUD et al., 2009). Os tipos de tratamento variam de simples soluções primárias, como fossas sépticas, a sofisticadas tecnologias secundárias e terciárias que são muito eficazes do ponto de vista sanitário e ambiental (CAPODAGLIO et al. 2017).

A adoção de arranjos tecnológicos mais sofisticados permite que o efluente tratado seja considerado um recurso em vez de um problema, já que os subprodutos podem ser recuperados e reutilizados, incluindo a água de reúso, energia e fertilizantes orgânicos. O reúso de água é uma das estratégias apontadas pelo PLANSAB para atingir a meta de universalização do saneamento e é incentivada pela Lei Nº 14.026/2020 (BRASIL, 2013, 2020).

Como resultado, a coleta e o tratamento adequados dos esgotos domésticos são essenciais para garantir a qualidade da saúde humana e do meio ambiente (METCALF & EDDY, 2016). Assim, entende-se que a descentralização do tratamento dos esgotos e o aproveitamento dos subprodutos gerados é um caminho recomendado para o alcance da universalização ao acesso à água e aos serviços de esgotamento sanitário, além de aumentarem a possibilidade do alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), em particular, o ODS 6 (ONU, 2021).

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos, denominado Ecossistema Engenheirado (EE), instalado no Centro de Estudos Ambientais e Desenvolvimento Sustentável (CEADS) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) localizado na Ilha Grande – RJ para disposição final adequada e/ou aproveitamento do efluente tratado.

1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência do tratamento de esgoto doméstico para remoção de poluentes físico-químicos e microbiológicos visando atender a legislação vigente;
- Avaliar a eficiência do tratamento de esgoto doméstico para remoção de poluentes emergentes;
- Validar um modelo de gestão operacional em sistemas descentralizados de esgotos domésticos;
- Propor diferentes aplicações de reúso da água tratada a partir das eficiências obtidas de acordo com o quadro regulatório nacional; e
- Elaborar um manual técnico operacional para cada etapa do sistema, com linguagem acessível, para permitir replicação em diferentes regiões em desenvolvimento.

1.3. Estrutura do Trabalho

Esse trabalho foi organizado em algumas etapas, começando pela Introdução, onde foi exposto o tema do estudo, o problema e os objetivos.

O capítulo 1 (um) foi da Revisão Bibliográfica que apresentou uma revisão sistemática da literatura e aspectos legais nacionais sobre reúso de água e tratamento de esgotos.

Em seguida, no capítulo 2 (dois) tem-se a Metodologia, onde foram descritos o local de pesquisa, o sistema de tratamento estudado e o procedimento experimental para realização da pesquisa.

O capítulo 3 (três) apresentou e interpretou os resultados encontrados na operação e monitoramento do sistema em estudo, sendo os Resultados e Discussão.

Por fim, no capítulo 4 (quatro) foram feitas as conclusões da pesquisa e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica do presente trabalho desenvolveu-se em 3 etapas, sendo elas:

Etapa 1) Publicações científicas realizadas durante o período do mestrado, previamente listadas no item de Produções Acadêmicas, onde foram abordados os assuntos sobre tratamento descentralizado de esgotos domésticos, saneamento rural e a tecnologia do Ecossistema Engenheirado;

Etapa 2) Revisão Sistemática da Literatura (na forma de manuscrito - não submetido) para identificar os principais estudos/trabalhos sobre aplicações de reúso em sistemas descentralizados nas áreas isoladas, as tecnologias aplicadas e o arcabouço legal para utilização da água de reúso. Pelo fato de a revisão ter sido realizada em inglês, não foram absorvidos os aspectos legais nacionais, por isso fez-se necessária a etapa 3;

Etapa 3) Aspectos legais nacionais para tratamento de efluentes domésticos e aplicação de reúso de água.

2.1. Revisão Sistemática da Literatura

A revisão sistemática da literatura (RSL), desenvolvida neste trabalho, tem estrutura de um manuscrito, pois será submetida para publicação em periódico científico indexado.

Título: Tratamento descentralizado de esgoto doméstico e as principais aplicações de água de reúso: revisão sistemática

Introdução: já foi apresentada anteriormente.

Objetivo: Levantar as principais aplicações de água para reúso em sistemas descentralizados de tratamento de esgotos nas áreas isoladas nos últimos 20 anos.

Metodologia da RSL

Para o desenvolvimento do estudo, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida seguindo um protocolo desenvolvido em 3 fases (OKOLI, 2019). Na Fase 1 foi realizada o Planejamento do trabalho, com a definição dos objetivos e as questões da pesquisa (QP). Na Fase 2 ocorreu a condução do trabalho, com a organização, busca, seleção, extração dos dados e sumarização dos resultados. Por fim,

na Fase 3, denominada de Documentação, foi desenvolvida a discussão dos resultados obtidos nas fases anteriores (OKOLI, 2019).

Fase 1 – Planejamento

Primeiramente, definiu-se o objetivo, que desempenhou a função de conduzir e nortear o trabalho. Sendo este, o de “levantar as principais aplicações de água de reúso em sistemas descentralizados de tratamento de esgotos nas áreas isoladas nos últimos 20 anos”. Após isto, foram elaboradas as questões de pesquisa (QP) para o desenvolvimento do trabalho, sendo elas:

- QP1 – Quantos trabalhos foram feitos ao redor do mundo?
- QP2 – Quais as principais aplicações da água de reúso nas áreas isoladas?
- QP3 – Quais diretrizes/regulamentações foram usadas para aplicação de água de reúso?
- QP 4 – Quais as tecnologias usadas e parâmetros avaliados para aplicação da água de reúso?

Fase 2 – Condução

Nesta fase, foram definidas as premissas correlacionadas ao cerne das perguntas. A primeira premissa foi o **recorte temporal**, seguido pela **seleção das palavras-chave** e, por fim, a **definição das bases de dados** a serem utilizadas para a pesquisa dos artigos.

- Premissa 1 – Recorte temporal

O recorte temporal definido foi de 20 anos, a partir de 2002 até agosto de 2022. A definição do mês de agosto de 2022 é justificada pela realização do procedimento de seleção dos trabalhos.

- Premissa 2 – Definição das palavras-chave:

Com base nas perguntas do trabalho, definidas na Fase 1, foram selecionadas as palavras-chave a serem aplicadas nas bases de dados, posteriormente definidas. As palavras-chave em inglês foram: "water reuse" OR "reclaimed water" OR "recycle water" AND "rural sanitation" AND "decentralized wastewater treatment" AND

"*application*" OR "*uses*". A busca por meio de palavras-chaves em inglês permite obter uma amostragem com um maior número de trabalhos e pesquisas ao redor do mundo.

- Premissa 3 – Escolha da base de dados

A escolha da base de dados para a aplicação das palavras-chaves definidas na premissa anterior foi a base de dados eletrônica do Google Acadêmico. A escolha dessa plataforma foi com o objetivo de encontrar uma quantidade maior de trabalhos com informações do Brasil.

Fase 3 – Documentação

As análises dos trabalhos obtidos foram de acordo com a aderência às Fases 1 e Fase 2. Para tal, foram estabelecidos critérios de seleção de inclusão e exclusão. Os critérios adotados para inclusão foram: i) estudos com aplicação da água para reúso; e, ii) estudos sobre sistemas descentralizados de esgotos em áreas isoladas/rurais. O critério de exclusão foi para os documentos que estavam fora do objeto de pesquisa.

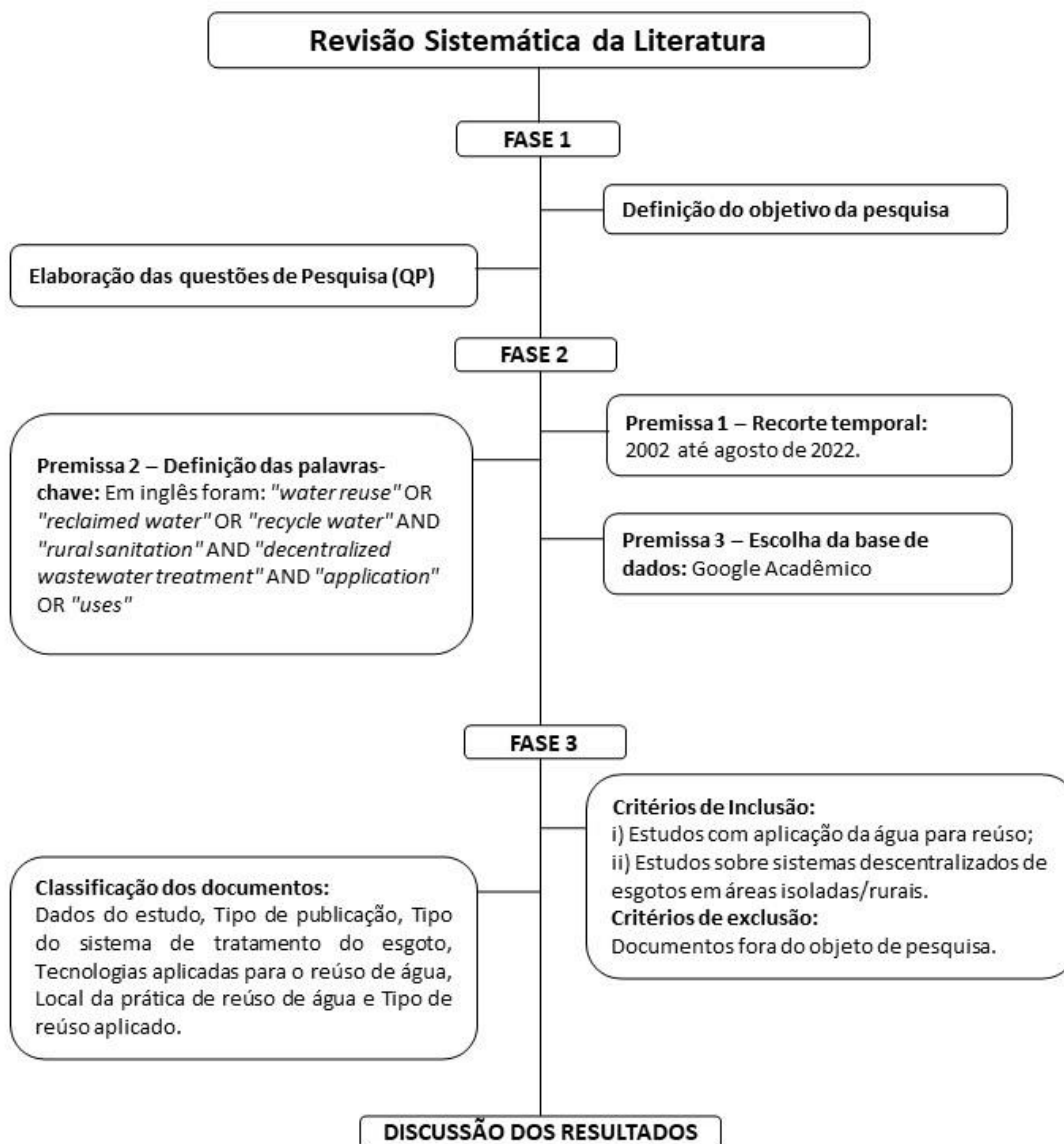
Nesta fase, foram analisados os documentos obtidos nas fases anteriores, de acordo com os critérios de classificação. Para tal, foram realizadas duas triagens: Triagem 1 – Leitura dos títulos e resumos dos trabalhos encontrados; e, Triagem 2 – Leitura completa dos trabalhos.

Após a análises dos trabalhos selecionados e a aplicação dos critérios de seleção, os documentos foram classificados de acordo com os seguintes itens, em planilha eletrônica:

- dados do estudo: Título, autores e ano de publicação;
- tipo de publicação: Artigo, TCC – Trabalho de Conclusão de Curso, Dissertação, entre outros;
- tipo do sistema de tratamento do esgoto;
- tecnologias aplicadas para o reúso de água;
- local da prática de reúso de água e
- tipo de reúso aplicado.

Por fim, realizou-se a discussão dos resultados obtidos em relação à temática apresentada no objetivo, além da categorização dos documentos de forma sistematizada. A síntese do processo metodológico pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Esquematização do processo de Revisão Sistemática da Literatura descrita na metodologia.



Fonte: A Autora, 2023.

Resultados e Discussões da RSL

Fases 1 e 2

O desenvolvimento da RSL seguiu as fases propostas anteriormente na metodologia, com base no contexto da escassez hídrica, reúso de água e dos sistemas descentralizados de tratamento de esgotos nas áreas isoladas.

Por meio da pesquisa das palavras-chave no banco de dados escolhido, juntamente com o recorte temporal definido, foram identificados 53 trabalhos, que seguiram para Fase 3.

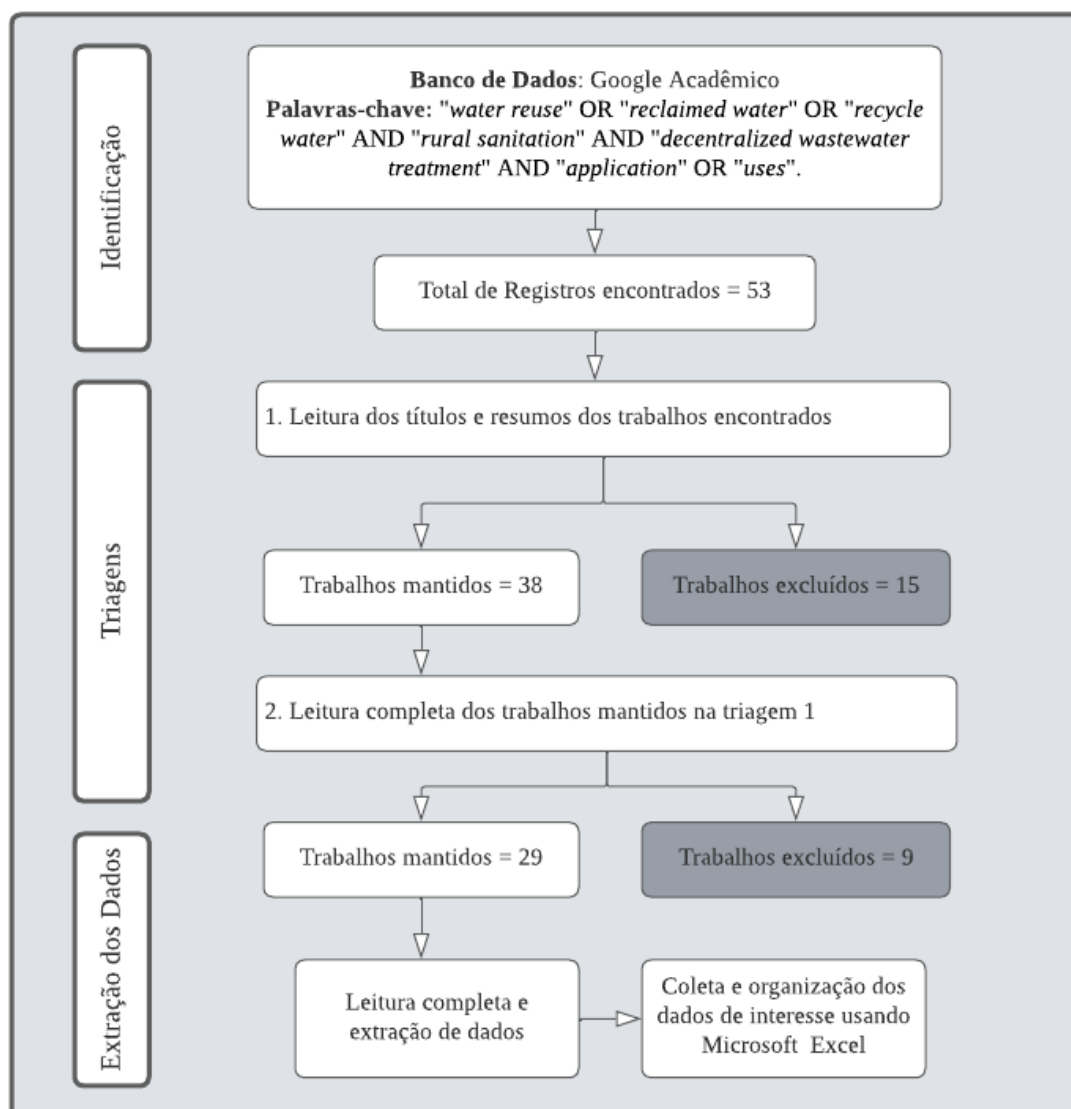
Fase 3 – Documentação

Na **Triagem 1** foi realizada a leitura do título e o resumo dos documentos para a avaliação da aderência à pergunta do presente estudo. Com isso, do total levantado (n=53), foram excluídos 15 trabalhos.

Os 38 trabalhos restantes foram submetidos à análise da **Triagem 2** com a leitura completa dos mesmos. Assim, foram excluídos 9 trabalhos que não estavam de acordo com o objetivo do estudo.

Por fim, com os 29 trabalhos restantes, foram extraídos os dados previamente estabelecidos e analisados, conforme o fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Esquema do processo de busca e seleção dos trabalhos.

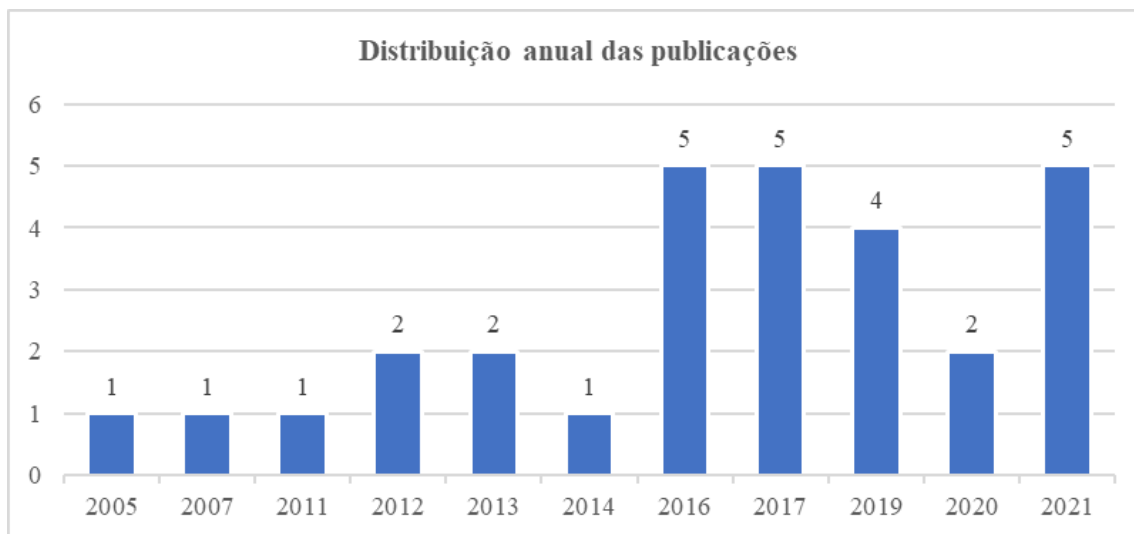


Fonte: A Autora, 2023.

Após a seleção definitiva dos 29 artigos foi realizada uma análise quantitativa, observando o número de publicações por ano (Figura 3). Nos últimos 10 anos (2012 a 2022) a quantidade de estudos sobre reúso de água em áreas isoladas apresentou um crescimento expressivo, tendo em vista que 84% dos estudos analisados concentraram-se nesse período.

Cabe-se ressaltar que no ano de 2022 até agosto, não foram verificados estudos publicados que se enquadrassem nos critérios estabelecidos na metodologia.

Figura 3 - Distribuição anual das publicações sobre reúso de água em áreas isoladas no período de 2002 a 2022.



Nota: Nos anos de 2002 a 2004 e 2022 não houve trabalhos selecionados para este estudo. Fonte: A Autora, 2023.

Em relação ao tipo de trabalho, dos 29 analisados, 14 foram classificados como artigos científicos, representando, aproximadamente, 50% do total. A segunda maior porcentagem foi de artigos de revisão (20%). Os demais trabalhos foram classificados como: Estudo de caso, Dissertação, Tese, TCC, Livro, Relatórios e Resumos, alcançando no máximo 2 resultados de cada.

Sobre a distribuição geográfica por continentes e países (Figura 4) a maioria dos estudos encontrados (52%) foi desenvolvido no continente Asiático, em especial no subcontinente do Oriente Médio (Israel, Jordânia e Palestina). Cabe destacar que Israel enfrenta uma elevada escassez hídrica, onde mais de metade do território é considerado árido ou semiárido (MEGERSA & ABDULAH, 2015).

Singh et al. (2017) relatam que na Índia, apesar da escassez de água existente em grande parte do país, este ainda não possui programas de sensibilização à população para promover a utilização de águas residuais tratadas na irrigação, por exemplo. O desenvolvimento deste setor no país poderia fornecer suprimentos para aplicações não potáveis, reduzindo os impactos do estresse hídrico, promovendo a preservação ambiental e sendo uma alternativa viável para sua aplicação na agricultura.

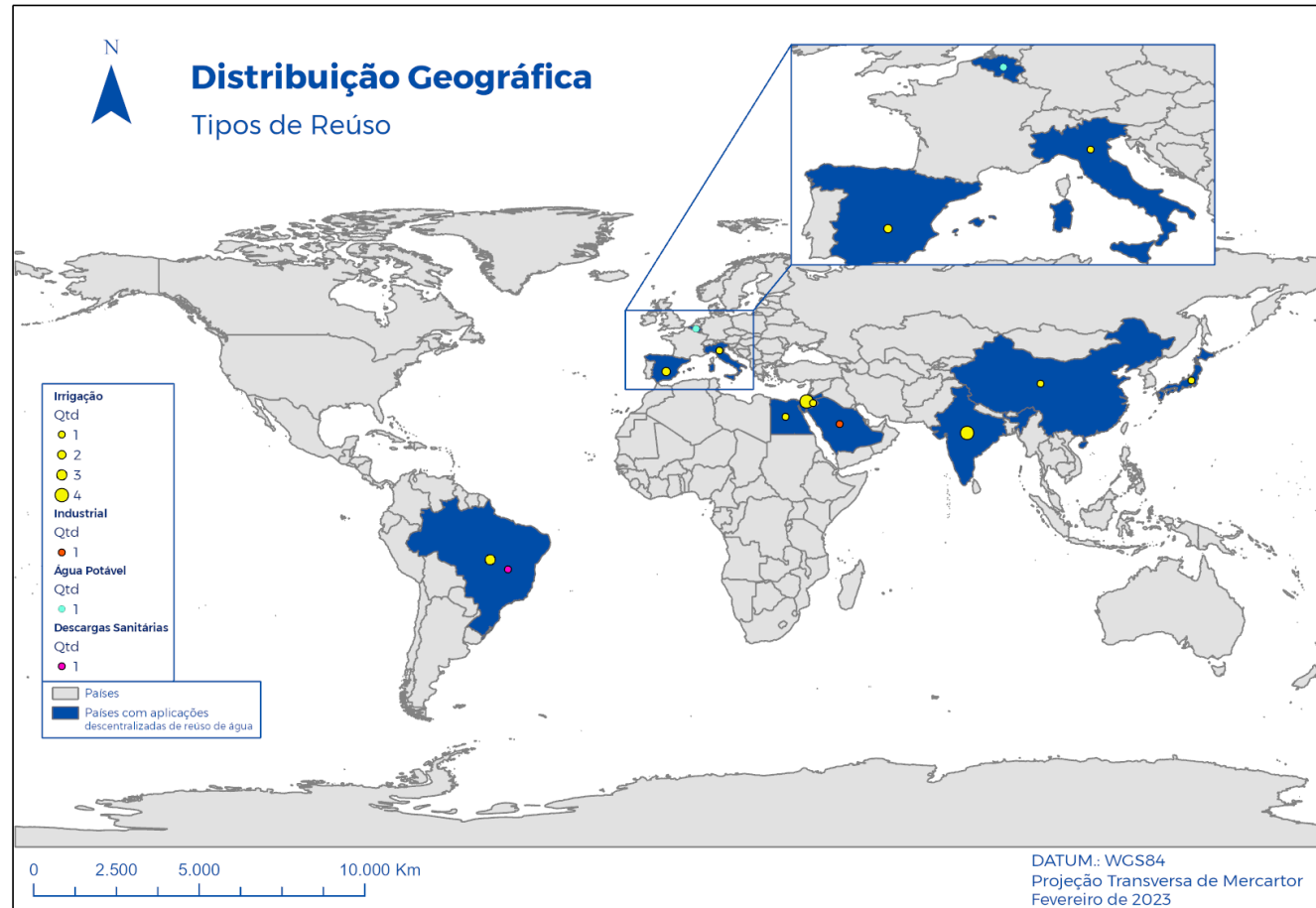
O uso de águas residuais recuperadas na Palestina é uma grande prioridade, no entanto, a aceitação da população é um dos principais problemas associados com a expansão do reúso de água na agricultura. Tal prática pode se tornar real quando sistemas

de tratamento eficazes forem implementados e os padrões de irrigação para efluentes tratados forem cumpridos, além do desenvolvimento de estratégias e diretrizes para incentivar o reúso de água (ZIMMO, 2005).

O Brasil apresenta um cenário hídrico satisfatório com mais de 250 mil m^3s^{-1} escoando pelo território, porém, cerca de 80% desse volume é encontrado na bacia Amazônica (ANA, 2021). Entretanto, essa região é a que apresenta a menor quantidade populacional do país, além da menor demanda hídrica (SANTOS et al., 2021).

Ainda em relação ao reúso de água no Brasil, a recuperação de nutrientes apresenta-se como um dos maiores benefícios para fins agrícolas, destacando o enriquecimento da fertilidade do solo (LINO & ISMAEL, 2013). Ao ser aplicado o reúso em sistemas descentralizados de tratamento de esgoto, se tem uma alternativa viável para melhoria da situação sanitária em pequenas comunidades isoladas e uma contribuição para o desenvolvimento da segurança alimentar (CARDONA et al., 2014). No entanto, a falta de uma legislação específica para o reúso de água no Brasil faz com que a aplicação seja incipiente (FERREIRA et al, 2021).

Figura 4 - Distribuição espacial e tipos de reuso de água durante o período de 2002 a 2022 em sistemas descentralizados de tratamento de esgotos domésticos nas áreas rurais encontradas na revisão sistemática da literatura.



Fonte: A Autora, 2023.

Os 29 trabalhos analisados também foram classificados de acordo com o tipo de aplicação da água para reúso (Figura 4). O reúso para fins agrícolas, com aplicação na irrigação, foi abordado em 22 documentos; já as outras finalidades, como reúso em descargas sanitárias, fins potáveis e industriais foram estudados nos demais trabalhos (n=7).

O uso da água na irrigação vem representando a maior demanda no Brasil e no mundo (ANA, 2017). Portanto, aplicar as águas residuais tratadas nesta área diminuiria a pressão nos recursos hídricos e aumentaria a disponibilidade de água para outras necessidades (LIMA et al., 2021). A escolha de sistemas descentralizados de tratamento de efluentes instalados próximos a áreas agrícolas facilitaria a aplicação desta água de reúso, já que esta não precisaria ser transportada por longas distâncias para ser usada na irrigação (SANCTIS et al., 2017). No entanto, a aplicação da água de reúso precisa ser implementada com segurança para evitar a contaminação por patógenos e evitar colocar em risco a saúde pública e o meio ambiente (KAETZL et al., 2019).

Em relação a produção da água para reúso, as tecnologias de tratamento primário mais adotadas nos trabalhos levantados basearam-se majoritariamente em unidades anaeróbias, com 5 estudos usando tanques anaeróbios, 3 estudos com reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e 3 trabalhos com tanques sépticos. Como pós-tratamento primário, a tecnologia mais aplicada foi a de *Wetlands* Construídos (WC), com 7 estudos, seguida do filtro e biofiltro anaeróbio em 2 e 1 trabalho, respectivamente.

A desinfecção do efluente tratado, com o objetivo do reúso, foi abordado em alguns trabalhos, sendo a radiação ultravioleta (UV) a mais aplicada, totalizando 5 trabalhos, em seguida a cloração com 4 estudos, a ozonização com 1 e a lagoa de polimento também com 1 documento (Quadro 1).

Quadro 1 - Tecnologias descentralizadas de tratamento do esgoto domésticos e suas aplicações de reúso encontradas na RSL.

Aplicação de reúso	Tecnologia de tratamento primário	Pós-tratamento	Desinfecção	Referência
Irrigação	Tanque Anaeróbio	Wetland Construído Vertical Francês (WCVF) + WCVF recirculante	-	TRAVIS et al., 2012
		Sistema de tratamento natural	-	CHEN & FUKUSHI, 2016
		Tanque de aeração + Ozonização	Ozonização	HUB & WU, 2021
		WC + LED UV	LED UV	KASUN, 2016
	UASB	Filtro Anaeróbio + Filtro de Areia	-	SOUZA et al., 2020
		WC de Fluxo Vertical + WC de Tratamento de Lodo	-	CARDONA et al., 2014
	Tanque séptico	Filtro de Areia	-	SOUZA et al., 2020
		Reator anaeróbico + Filtro Anaeróbio + WC	-	SOKHELA, 2021
	Tanque de sedimentação + UASB	Filtro Anaeróbio + WC + Lagoa de Polimento	Lagoa de Polimento	SINGH et al., 2017
		WC	Lagoa Anaeróbia	-
Coagulação Química		Reator Aeróbio + Foto-oxidação + Cloração	Foto-oxidação (UV) + Cloração	RANJAN et al., 2019
Reatores granulares de biofiltro		Filtro de areia	-	SANCTIS, 2017
Lodo ativado		WC + Cloração	Cloração	OTTER et al., 2020
		Lagoa de algas + WC + Cloração	Cloração	HUB & WU, 2021
Lagoa de alta taxa		WC + Cloração	Cloração	OTTER et al., 2020
Descarga sanitária	UASB	Biofiltro anaeróbio + 4 WC + Foto reatores (UV)	Foto reatores (UV)	LUTTERBECK et al., 2017
Potável	Tanque séptico	WC de fluxo vertical + Membrana + LED UV	LED UV	LAKHO et al., 2021
Industrial	Tanque Anaeróbio	WC + LED UV	LED UV	KASUN, 2016

Fonte: A Autora, 2023

Dos 18 trabalhos que descreveram os sistemas de tratamento, 7 foram em escala real, 4 pilotos e os demais em escala de bancada ou experimental. Nos estudos realizados em escala real, a vazão de tratamento foi inferior a $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, podendo ser classificados como unidades de tratamento de esgoto de pequeno porte de acordo com a Resolução CONAMA nº 377/2006 (BRASIL, 2006).

Dentre os 29 trabalhos analisados, somente 8 apresentaram dados de desempenho do sistema de tratamento do efluente. Nestes, os parâmetros analisados variaram de análises físico-químicas como pH, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST), Temperatura, Oxigênio Dissolvido (OD), Turbidez, Nitrogênio Total (Nt), Fósforo Total (Pt), análises microbiológicas, como *Escherichia coli* (*E. coli*), até poluentes emergentes (Diclofenaco, Carbamazepina etc.).

A verificação do desempenho dos sistemas de tratamento de esgotos para aplicação de reúso foi realizada segundo algumas diretrizes, conforme apresentado no Quadro 2. Sanctis (2017) usou as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) para uso seguro de águas residuais na agricultura (OMS, 2006), Lutterbeck et al. (2017) aplicou as diretrizes para água de reúso da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2012) e o guia de reúso do Estado do Hawai (2016). Lakho et al. (2021) utilizou os padrões de água potável conforme regulamentado pela Diretiva Europeia de água Potável CE 83/1998.

No Brasil não há uma regulamentação à nível nacional que defina os critérios para cada tipo de reúso de água. O Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB, 2006) buscou indicar algumas normas de qualidade para reúso, com base nos riscos microbiológicos. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) publicou um documento com orientações para projetos de reúso na agricultura (CETESB, 2006). Destaca-se que tanto os padrões indicados pelo PROSAB como aqueles indicados pela CETESB não são mandatórios.

Quadro 2 - Diretrizes com os critérios de qualidade para reúso de água encontrados nos trabalhos analisados.

Resoluções / Legislações		USEPA (2012)	OMS (2006)	Hawai (2016)	Diretiva Europeia de Água Potável (1998)	PROSAB (2006)	CETESB (2006)
Tipo de reúso		Não potável - agrícola restrito		Não potável - irrestrito a restrito	Potável	Não potável - agrícola restrito	
Critérios indicadores de patógenos	Coliformes Termotolerantes	< 200 NMP 100 mL ⁻¹ (1)	10 ⁴ a 10 ⁶ NMP 100 mL ⁻¹ (2) (3)	< 200 NMP 100 mL ⁻¹ (1)	0 NMP 100 mL ⁻¹ (3)	10 ⁴ a 10 ⁵ NMP 100 mL ⁻¹ (2)	10 ³ a 10 ⁵ NMP 100 mL ⁻¹ (2)
	Ovos de helmintos	-	< 1 ovo de helminto L ⁻¹	-	-	< 1 ovo de helminto L ⁻¹ (2)	< 1 ovo de helminto L ⁻¹
Outros critérios	pH	6,0 - 9,0	-	-	6,5 - 9,5	-	-
	DBO	< 30 mg L ⁻¹	-	30 - 60 mg L ⁻¹	-	-	-
	SST	< 30 mg L ⁻¹	-	30 - 60 mg L ⁻¹	-	-	-
	Cl2 residual	-	-	2 mg L ⁻¹	-	-	-
	Nitrato	-	-	-	50 mg L ⁻¹	-	-
	Nitrito	-	-	-	0,5 mg L ⁻¹	-	-

Legenda: (1) A USEPA e Hawai utilizam coliformes fecais como critério indicador de patógenos; (2) Varia de acordo com a técnica de irrigação, tipo de cultura e grupos expostos; (3) A OMS e Diretiva Europeia de Água Potável utilizam *Escherichia coli* (*E. coli*) como critério indicador de patógenos. Fonte: A Autora, 2023.

Combinações de processos anaeróbios e aeróbios, como os exemplificados por Travis et al. (2012) e Souza et al. (2020) apresentam altas eficiências de remoção da carga orgânica, com redução de 90% de DBO, 93% de SST e 60-76% de Amônia. Quanto à remoção de *E. coli*, o tratamento final com WCVF (TRAVIS et al, 2012) garantiu a remoção de 99,3%, atendendo as diretrizes da OMS (2006) para utilização de águas residuais na agricultura mecanizada. Já o sistema com filtros de areia (SOUZA et al, 2020) como polimento final, foi eficiente na remoção de ovos de helmintos e de *E. coli*, atendendo os padrões da OMS (2006) para uso restrito na agricultura. Para aplicações de reúso irrestritas, recomendou-se o uso de uma unidade de desinfecção.

O estudo de Lutterbeck et al. (2017), que combinou UASB + Biofiltro Anaeróbio + 4 WC + Fotoreatores de UV alcançou uma eficiência de redução de 98% de DBO, 97% de Nitrogênio Total, 90% de Fósforo Total e *E. coli* <18 NMP 100 mL⁻¹, atendendo as diretrizes da USEPA (2012).

Com intuito de alcançar os padrões mais restritos de reúso potável, geralmente são usados sistemas de tratamento mais robustos, como o modelo híbrido apresentado por Lakho et al. (2021), composto por Tanque Séptico + WC Vertical + Membrana + LED UV, que alcançou os padrões estabelecidos pela Diretiva Europeia de Água Potável (1998).

Conclusões da RSL

Por meio da revisão sistemática da literatura foram identificados 29 trabalhos sobre sistemas descentralizados de tratamento de esgotos com aplicação de reúso em áreas isoladas ao redor do mundo. O número de publicações nesta área vem aumentando nos últimos 10 anos (2012 - 2022), principalmente nos países Asiáticos, o que indica que o interesse por este tema vem aumentando, especialmente em regiões com maior estresse hídrico.

A principal aplicação de reúso abordada nos trabalhos selecionados foi para irrigação, sendo aplicada ou proposta em 22 deles. Já para outras finalidades, como reúso em descargas sanitárias, reúso potável e reúso industrial foram verificadas em somente 1 trabalho de cada.

Após a avaliação dos resultados obtidos foi verificado que o reúso foi realizado usando uma variedade de combinações tecnológicas, o que demonstra uma flexibilidade nos sistemas descentralizados. No entanto, o uso predominante de sistemas convencionais, como Tanque Anaeróbios, Tanques Sépticos e UASB se destacaram como unidades primárias. O módulo de tratamento secundário mais usado foi o sistema baseado na natureza, *Wetlands* construídos. Já para um reúso menos restrito, foram usadas as tecnologias de desinfecção, com destaque para a radiação UV.

Percebe-se que poucos estudos têm investigado o reúso de água em áreas rurais, limitando a aplicação dos efluentes tratados. Dessa forma, tem-se um campo de estudo que precisa se desenvolver para ser mais uma ferramenta para o alcance da universalização do saneamento e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis, em especial, o ODS 6.

2.2. Aspectos legais nacionais

Para o entendimento completo dos aspectos legais que balizam o aproveitamento dos efluentes tratados para reúso de água no Brasil, foram usados os estudos desenvolvidos por Santos et al. (2020), Santos, Lima e Silva Junior et al. (2021) e Santos & Lima (2022), que realizaram um amplo compilado sobre os documentos reguladores nacionais a nível federal e estaduais, que definem padrões de qualidade de água para a prática de reúso

A evolução do arcabouço legal para esta prática foi resumida no Quadro 3, onde foram apresentados os padrões de qualidade de água para reúso para diferentes aplicações, adaptada do estudo de Santos & Lima (2022). Ressalta-se que os autores deram ênfase aos parâmetros mais usuais de qualidade de água, tais como Coliformes, DBO, SST, Cloro Residual (livre e total) e Turbidez.

Quadro 3 - Principais documentos reguladores com padrões e aspectos mais relevantes para aplicação de reúso de água nos diferentes estados do Brasil.

Regulamentos	Padrões de reúso	Aplicações de reúso
Bahia - Resolução CONERH nº 75/2010	<p>Categoria A - Coliformes: 10^3 Org · 100 mL⁻¹ (Ct).</p> <p>Categoria B - Coliformes: 10^4 Org · 100 mL⁻¹ (Ct).</p>	<p>Categoria A: irrigação, inclusive hidroponia, de qualquer cultura incluindo produtos alimentícios consumidos crus.</p> <p>Categoria B: irrigação, inclusive hidroponia, de produtos alimentícios não consumidos crus e não alimentícios, forrageiras, pastagens, árvores, revegetação e recuperação de áreas degradadas.</p>
Ceará - Resolução COEMA nº 02/2017 ¹	<p>Urbano (exceto irrigação paisagística) - Coliformes: 5×10^3 Org·100 mL⁻¹ (Ct).</p> <p>Irrigação paisagística: 10^3Org·100 mL⁻¹ (Ct).</p> <p>Agrícola/florestal-a - Coliformes: ND Org·100 mL⁻¹ (Ct).</p> <p>Agrícola/florestal-b - Coliformes: 10^3 Org·100 mL⁻¹ (Ct).</p> <p>Ambiental - Coliformes: 10^4 Org·100 mL⁻¹ (Ct).</p> <p>Aquicultura - Coliformes: 10^3 Org·100 mL⁻¹ (Ct).</p>	<p>Urbano: irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate de incêndio em área urbana.</p> <p>Agrícola/florestal-a: culturas a serem consumidas cruas, cuja parte consumida tenha contato direto com a água de irrigação.</p> <p>Agrícola/florestal-b: demais culturas.</p> <p>Ambiental: implantação de projetos de recuperação do meio ambiente.</p> <p>Aquicultura: criação de animais e cultivo de vegetais aquáticos.</p>
Programa Interáguas - 2018	<p>Agrícola restrito - Coliformes: 10^3 Org · 100 mL⁻¹ (Ct); DBO: 30 mg · L⁻¹; Cloro residual livre: > 1,0 mg · L⁻¹.</p> <p>Agrícola irrestrito – Coliformes: 10 Org · 100 mL⁻¹ (Ct); Turbidez: 5 NTU; DBO: 15 mg · L⁻¹; Cloro residual livre: > 1,0 mg · L⁻¹.</p> <p>Urbano restrito – Coliformes: 10^3 Org · 100 mL⁻¹ (Ct); Turbidez: 5 NTU; DBO: 30 mg · L⁻¹; Cloro residual livre: > 1,0 mg · L⁻¹.</p> <p>Urbano irrestrito – Coliformes: 10 Org · 100 mL⁻¹ (Ct); Turbidez: 5 NTU; DBO: 15 mg · L⁻¹; Cloro residual livre: > 1,0 mg · L⁻¹.</p> <p>Industrial – Coliformes: 10^3 Org · 100 mL⁻¹ (Ct).</p>	<p>Agrícola irrestrito: irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve rente ao solo sem processamento prévio.</p> <p>Agrícola restrito: irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve distante do solo sem ou após processamento prévio; irrigação de culturas não destinadas ao consumo humano; cultivo de florestas plantadas.</p> <p>Urbano irrestrito: irrigação paisagística, bacias sanitárias e lavagem de logradouros.</p> <p>Urbano restrito: irrigação paisagística e outros usos em áreas restritas, tais como desobstrução de redes de esgoto, construção civil, lavagem de veículos e combate a incêndio.</p>

	<p>Ambiental – Coliformes: 10^3 Org · 100 mL⁻¹ (Ct); DBO: 60 mg · L⁻¹.</p> <p>Aquicultura – Coliformes: 10^3 Org · 100 mL⁻¹ (Ct); DBO: 60 mg · L⁻¹.</p>	<p>Industrial: Aplicação em vários processos e atividades industriais.</p> <p>Ambiental: Aplicação em lagoas urbanas, manutenção de wetlands e aumento da disponibilidade hídrica para fins ambientais.</p> <p>Aquicultura: criação de peixe ou cultivo de vegetais aquáticos.</p>
São Paulo – Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01/2020	<p>Classe A – Coliformes: ND (Ct/<i>E. coli</i>); Turbidez: 2 NTU; DBO: 10 mg·L⁻¹; Cloro residual livre: $\geq 1,0$ mg·L⁻¹.</p> <p>Classe B - Coliformes: 200 Org·100 mL⁻¹ (Ct), 120 Org·100 mL⁻¹ (<i>E. coli</i>); DBO: 30 mg·L⁻¹; SST: 20 mg·L⁻¹; Cloro residual total: $\geq 1,0$ mg·L⁻¹.</p>	<p>Classe A (Irrestrito): irrigação paisagística; lavagem de logradouros e espaços públicos e privados; construção civil; desobstrução de galerias; lavagem de veículos; combate a incêndio.</p> <p>Classe B (Restrito): exclusivamente a todos os anteriores, exceto combate a incêndio.</p>
Rio Grande do Sul - Resolução CONSEMA nº 419/2020	<p>Urbano Classe A - Coliformes: 200 Org · 100 mL⁻¹ (Ct); Cloro residual total: $< 1,0$ mg · L⁻¹.</p> <p>Urbano Classe B - Coliformes: 10^3 Org · 100 mL⁻¹ (Ct).</p> <p>Agrícola/florestal - Coliformes: 10^4 Org · 100 mL⁻¹ (Ct).</p>	<p>Urbano Classe A (irrestrito): irrigação paisagística em locais de acesso irrestrito, lavagem de logradouros e veículos.</p> <p>Urbano Classe B (restrito): irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito, abatimento de poeira, construção civil, ETEs e desobstrução de tubulações</p> <p>Agrícola/florestal: irrigação de qualquer cultura, exceto frutos, hortaliças, raízes e tubérculos com contato direto com o solo ou com a água para consumo humano na forma crua.</p>
Minas Gerais - Deliberação Normativa CERH nº 65/2020	<p>Agrossilvipastoril amplo - Coliformes: 10^4 Org·100 mL⁻¹ (Ct/<i>E. coli</i>).</p> <p>Agrossilvipastoril limitado - Coliformes: 10^6 Org·100 mL⁻¹ (Ct/<i>E. coli</i>).</p> <p>Urbano amplo - Coliformes: 10^3 Org·100 mL⁻¹ (Ct/<i>E. coli</i>).</p> <p>Urbano limitado (exceto desobstrução de galerias) - Coliformes: 10^4 Org·100 mL⁻¹ (Ct/<i>E. coli</i>). Desobstrução de galerias: 10^7 Org·100 mL⁻¹ (Ct/<i>E. coli</i>)</p>	<p>Agrossilvipastoril amplo: fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão.</p> <p>Agrossilvipastoril limitado: fertirrigação superficial ou localizada, evitando contato da água de reúso com o produto alimentício.</p> <p>Urbano amplo: lavagem de pátios, logradouros ou outros com exposição similar; lavagem de veículos comuns; descargas sanitárias.</p> <p>Urbano limitado: lavagem de veículos especiais e externa de trens e aviões, controle de poeira, combate a incêndio, desobstrução de galerias.</p>

Legenda: Ct - Coliformes termotolerantes; *E. coli* - *Escherichia coli*; ND - Não detectável; NTU - Unidade de turbidez nefelométrica; DBO - Demanda bioquímica de oxigênio; SST – Sólidos suspensos totais. Notas: (1) Essa Resolução não tem o objetivo inicial de definir critérios para o reúso de água. O documento dispõe sobre padrões e condições de lançamentos de efluentes líquidos e apresenta as condições e padrões para o reúso. Assim, o estado não apresenta um documento regulador específico para a prática de reúso como os demais.

Fonte: Adaptado de Santos & Lima, 2022.

Pode-se observar, que além dos diferentes padrões de reúso apresentados no Quadro 3, outros aspectos foram abordados nestes documentos, como à definição de responsabilidades para produtores, distribuidores e usuários de água para reúso; o licenciamento obrigatório; à abordagem do risco microbiológico para saúde pública e meio ambiente; os níveis de restrição para cada tipo de aplicação; a frequência de monitoramento e à indicação de tecnologias de tratamento de esgoto para o alcance dos padrões de qualidade definidos.

Em todos os documentos foram identificadas recomendações sobre: definição de responsabilidades para produtores e usuários da água para reúso; o nível de restrição e a frequência de monitoramento. O licenciamento obrigatório apareceu nas resoluções do Ceará, São Paulo e Rio Grande do Sul. Em relação ao risco microbiológico, somente o programa Interáguas e os estados de São Paulo, de Minas Gerais e do Rio Grande do Sul abordam padrões associados ao risco. Quanto as tecnologias de tratamento, somente o estado de São Paulo e o programa Interáguas definiram fluxogramas de tratamento para atendimento aos padrões definidos.

Vale ressaltar que o nível de restrição foi caracterizado pelas categorias “restrito” ou “irrestrito” e “amplo” ou “limitado”. De forma geral, todos indicam maior ou menor restrição de aplicações, considerando os padrões de qualidade. Usos restritos e limitados permitem padrões mais flexíveis, enquanto usos irrestritos ou amplos padrões mais restritivos (SANTOS & LIMA, 2022).

Todas as resoluções apresentaram faixas para uso mais ou menos restritivo de acordo com a aplicação de reúso. As resoluções com padrões mais restritivos, com coliformes entre nenhum detectável a $200 \text{ Org } 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$ foram de São Paulo (Classe “A” e “B”), Rio Grande do Sul (Urbano Classe “A”), Ceará (Agrícola/Florestal “a”) e o programa Interáguas (Agrícola e Urbano irrestritos). Já com padrões menos restritivos, com coliformes entre 10^3 e $10^6 \text{ Org } 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$ foram os documentos da Bahia (Categoria “A” e “B”), Minas Gerais (Agrossilvipastoril e Urbano amplo e limitado), Ceará (Urbano, Irrigação paisagística, Agrícola/Florestal “b”, Ambiental e Aquicultura), programa Interáguas (Agrícola e Urbano restritos, Industrial, Ambiental e Aquicultura) e Rio Grande do Sul (Urbano Classe “B” e Agrícola/ Florestal).

Diante disso, os documentos citados indicaram padrões de qualidade de água para reúso e determinaram níveis de restrição diferentes para aplicações diversas, que estão relacionados com os objetivos do reúso, aos riscos associados e à condição socioeconômica da região. Sendo assim, mesmo que de maneira morosa devido aos desafios do Brasil – país de dimensões

continentais e diferentes características sociais, culturais, econômicas e ambientais – há um avanço na atualização de padrões para reúso de água.

No entanto, a situação legal brasileira, em termos de reúso de água, ainda é muito incipiente, tendo muitas regiões do país a falta de uma regulamentação, como é o caso do Estado do Rio de Janeiro; este até publicou documento legal para este fim (Decreto Estadual nº 47.403/2020), mas sem a definição dos padrões de qualidade de água. Portanto, ainda se faz necessário o uso de legislações que estabelecem critérios e padrões de lançamento dos efluentes sanitários tratados em corpos receptores sem a viabilização efetiva da prática do reúso de água.

Em relação aos critérios e padrões de lançamento de efluentes líquidos em corpos receptores no Estado do Rio de Janeiro, há o instrumento legal vigente, a Norma Operacional Padrão do Instituto Estadual do Ambiente – a NOP-INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021). Em relação aos valores máximos permissíveis para parâmetros específicos de qualidade de água, estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Condições de lançamento de efluentes líquidos em corpos receptores definidos pela NOP-INEA n° 45/2021.

Parâmetros	Padrões de lançamento
pH	5 – 9
Temperatura	<40°C
Sólidos Sedimentáveis	até 1 mL L ⁻¹
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ⁽¹⁾	120 a 40 mg L ⁻¹
Sólidos Suspensos Totais (SST) ⁽¹⁾	110 a 40 mg L ⁻¹
Nitrogênio Amoniacal Total ⁽²⁾	<20 mg L ⁻¹
Fósforo Total	4 mg L ⁻¹
Óleos e graxas	até 50 mg L ⁻¹
MBAS (substâncias tensoativas que reagem ao azul de metileno)	2 mg L ⁻¹

Nota: 1) O limite de lançamento da DBO e do SST é em função da carga orgânica bruta; 2) O órgão ambiental poderá autorizar o lançamento acima do valor pré-estabelecido, desde que sejam observados ao menos um dos requisitos: a) comprovação de relevante interesse público com adoção de soluções graduais e progressivas que garantam a universalização dos serviços; b) atendimento ao enquadramento dos corpos receptores e às metas intermediárias e finais, progressivas e obrigatórias do mesmo, devidamente comprovada através de estudo de autodepuração e plano de monitoramento com modelos tecnicamente aceitos pelo órgão ambiental, c) para os casos em que a carga orgânica afluyente seja menor que 60 kg DBO dia⁻¹. Fonte: Adaptado de Rio de Janeiro, 2021.

A NOP INEA n° 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021), representou uma importante evolução normativa da legislação ambiental do Estado do Rio de Janeiro, pois atualizou conceitos e princípios em consonância com a legislação federal, unificou diretrizes e normas anteriormente vigentes e incorporou ajustes em relação aos valores máximos permissíveis para os parâmetros de qualidade da água residuária.

Esses padrões de qualidade das águas residuárias, para serem alcançados, dependem da tecnologia de tratamento de esgoto adotada e do seu desempenho. Em relação as eficiências usuais de remoção de DBO e SST ofertadas pelos processos convencionais de tratamento, espera-se que haja um desempenho de 30% se aplicado somente o tratamento primário (ex: tanque séptico e/ou decantador primário), 70% se empregados, exclusivamente, processos biológicos anaeróbios (ex: tanque séptico e filtro anaeróbio ou reator UASB) e 90% se aplicados processos biológicos aeróbios por meio de tecnologias de tratamento secundário (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Em relação as condições de lançamento de Nitrogênio Amoniacal Total, a sua concentração usual nos esgotos brutos é de 20 a 35 mg L⁻¹ (VON SPERLING, 2006), o processo específico de nitrificação e desnitrificação será imprescindível nos casos em que o efluente final

não estiver com a concentração de 20 mg L^{-1} , conforme estabelecida pela NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021).

Embora estudos técnicos já indiquem redução do padrão de concentração de Fósforo Total no esgoto bruto, motivada principalmente por alterações de processos produtivos da indústria de higiene e limpeza, a faixa típica no efluente bruto é de 4 a 15 mg L^{-1} (VON SPERLING, 2006). Dessa forma, é improvável garantir concentração de no máximo $4,0 \text{ mg L}^{-1}$ no efluente final conforme estabelecido pela NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021), sendo um parâmetro muito restritivo. A inclusão desta exigência para o lançamento de esgotos em corpos d'água de natureza lótica implica na obrigatoriedade de remoção de fósforo e no emprego de tecnologia de tratamento terciário baseada em processos biológicos de remoção de nutrientes ou tratamento físico-químico avançado (VOLSCHAN JR, 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Local de estudo

A Ilha Grande (IG) está localizada no município de Angra dos Reis, no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro (RJ). Tem uma área plana total de 193 km², onde mais de 80% do território pertence à União, tendo suas áreas protegidas e administradas pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Embora, juridicamente pertença ao município de Angra dos Reis como 3º Distrito municipal, com sede na Vila do Abraão, a região insular fica de frente também para os municípios de Mangaratiba e Paraty (ILHA GRANDE, 2020).

A IG possui aproximadamente 7.000 habitantes, agrupados em 13 núcleos (povoados ou comunidades) distribuídos ao redor da ilha e dispersos nas proximidades das praias costeiras. Os principais centros populacionais estão concentrados nas comunidades de Abraão e Provetá (ILHA GRANDE, 2020).

A região apresenta uma topografia montanhosa com uma cadeia principal e vários picos, sendo coberta pelo Bioma da Mata Atlântica e vegetação de afloramento rochoso, com estreitas planícies costeiras que acolhem restingas, planícies, lagoas e pequenos manguezais. Irrigada por dezenas de córregos e riachos que desaguam em praias e costões rochosos. A pesca é a atividade econômica que ocupa grande parte da população da Ilha Grande, dividindo com a atividade turística que se torna mais expressiva a cada dia (ILHA GRANDE, 2020).

A situação do saneamento básico da IG é semelhante as demais regiões isoladas do Brasil, tendo a prestação dos serviços de esgotamento sanitário insatisfatória. O esgotamento sanitário das comunidades da ilha, quando existente, é baseado principalmente em sistemas de tanques sépticos e sumidouros, mal dimensionados e sem uma manutenção adequada. Uma das exceções é a Vila de Abraão, que possui uma parte do esgotamento sanitário realizado pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE). Neste caso, o tratamento é composto por uma etapa preliminar (gradeamento e desarenador) e uma etapa primária avançada composta por reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), com disposição final por emissário submarino (ILHA GRANDE, 2020). Entretanto, este sistema atende apenas parte das edificações da vila, e as áreas não atendidas pela rede possuem sistemas descentralizados.

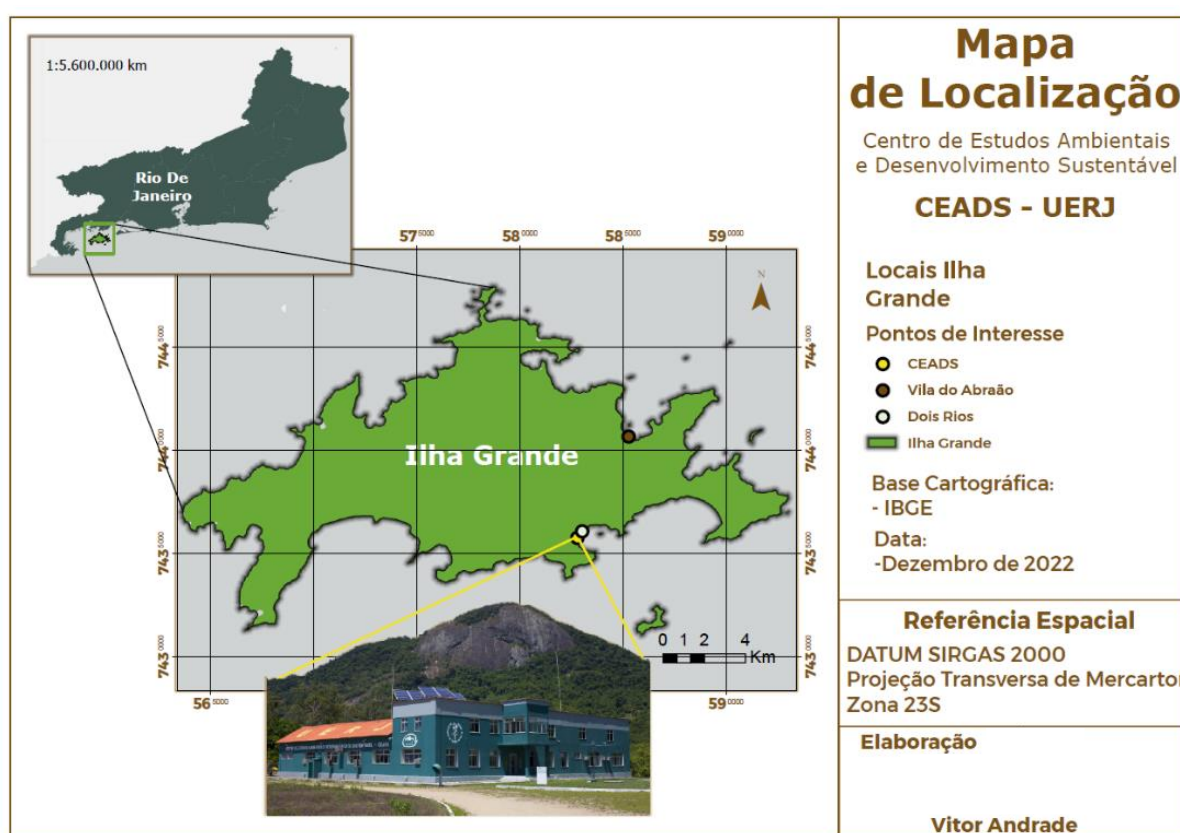
Na IG, o local escolhido para este estudo foi o Centro de Estudos Ambientais e Desenvolvimento Sustentável (CEADS), *campus* avançado de pesquisas da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), localizado na Vila de Dois Rios, Ilha Grande (23°11'7.15"S, 44°11'27.02"O) (Figura 5). Esta vila tem cerca de 120 habitantes e está inserida em uma área

de proteção ambiental, pertencente à Rede Mundial de Reservas da Biosfera da UNESCO desde 1992.

O CEADS é frequentado de forma temporária por alunos, professores e pesquisadores de diversos departamentos e de forma permanente pelos seus funcionários (equipe da cozinha, limpeza, manutenção, administração etc.).

O sistema descentralizado de tratamento de esgotos – Ecosistema Engenheirado (EE), objeto de estudo desta pesquisa, está situado ao lado do prédio do CEADS.

Figura 5 - Mapa de localização do CEADS na Vila Dois Rios, Ilha Grande – RJ.



Fonte: A Autora, 2022.

3.2. Ecosistema Engenheirado (EE)

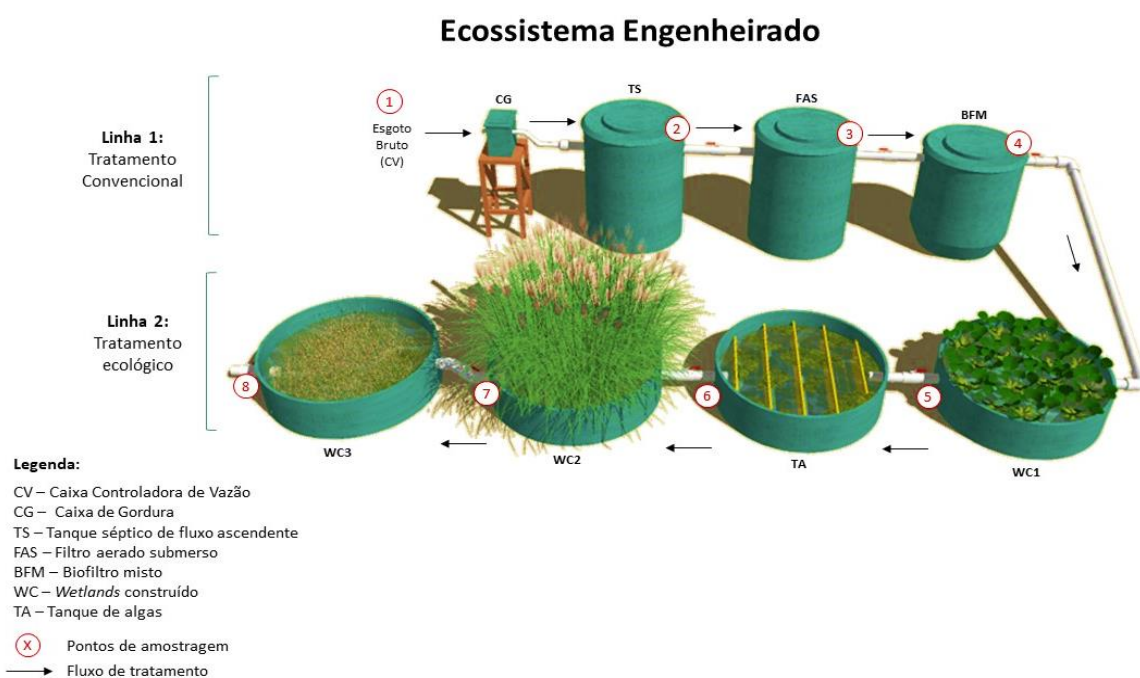
O EE é um sistema de tratamento descentralizado de esgotos domésticos, instalado e operado no CEADS desde 2010. Esse sistema foi projetado para atender, em média, 14 habitantes, com contribuição per capita de $87 \text{ L.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ (regime de alojamento) e uma vazão média de 1250 L.d^{-1} (52 L.h^{-1}), ocupando uma área de 25 m^2 (SALOMÃO, 2010).

Esse sistema combina tecnologias de tratamento convencional com soluções baseadas na natureza, como os *Wetlands* Construídos (WC). Essa composição promove um tratamento completo e eficaz, uma vez que em um só sistema há três etapas de tratamento (primário, secundário e terciário) (SALOMÃO et al., 2012).

Após mais de uma década de operação, o EE passou por algumas melhorias e o seu arranjo tecnológico atual (Figuras 6 e 7) é composto por duas linhas de tanques, sendo a primeira composta pelos tanques de tratamento convencional e a segunda pelos tanques de tratamento ecológico. O tratamento convencional equivale aos níveis de tratamento primário + secundário e o ecológico ao tratamento terciário, como polimento final do efluente. As dimensões dos tanques foram apresentadas na Tabela 1.

- **Linha 1:** Caixa controladora de vazão + caixa de gordura + tanque séptico de fluxo ascendente + filtro aerado submerso + biofiltro misto.
- **Linha 2:** WC1 de fluxo superficial com a macrófita *Eichhornia crassipes* (*Pontederiaceae*) – Aguapé + TA – tanque de algas + WC2 de fluxo subsuperficial com *Typha domingensis* (*Typhaceae*) – Taboa + WC3 de fluxo subsuperficial com gramíneas.

Figura 6 - Representação gráfica do Ecossistema Engenheirado – tratamento descentralizado de esgoto doméstico na Vila Dois Rios, Ilha Grande – RJ.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 7 - Fotografias do Ecossistema Engenheirado: (A) tratamento convencional, (B) Vista frontal do sistema e (C) Tratamento ecológico.



Fonte: A Autora, 2022.

Tabela 1 - Dimensões das unidades de tratamento que compõe o Ecossistema Engenheirado.

Unidades de Tratamento	Altura (m)	Lâmina d'água (m)	Diâmetro (m)	Área (m ²)	Volume (L)
Caixa de gordura	0,41	0,18	0,41	0,13	54,0
Tanque Séptico de Fluxo Ascendente	1,48	1,27	1,15	1,04	1591,0
Filtro Aerado Submerso	1,45	1,25	1,17	1,07	1559,0
Biofiltro Misto	1,30	1,15	1,15	1,04	1250,0
WC Superficial de <i>Eichhornia crassipes</i> (<i>Pontederiaceae</i>) – Aguapé	0,45	0,33	1,62	2,06	927,5
Tanque alagado de Algas	0,45	0,27	1,62	2,06	927,5
WC Subsuperficial de <i>Typha domingensis</i> (<i>Typhaceae</i>)	0,45	0,27	1,62	2,06	927,5
WC Subsuperficial de Gramíneas	0,45	0,10	1,62	2,06	927,5

Fonte: A Autora, 2022.

3.2.1. Etapa Preliminar

Antes do início da etapa primária do EE, tem-se o tanque pulmão (TP) e a caixa controladora de vazão (CV) (Figura 8). O tanque pulmão é formado por um tanque cilíndrico de 500 L de material de PVC. A caixa controladora de vazão é do tipo vertedor triangular Thompson com material de fibra de vidro. Ambos asseguram a entrada constante da vazão delimitada para o tratamento.

Figura 8 - Representação da linha 1- tratamento convencional com a presença das unidades responsáveis pelo controle da vazão.



Legenda:

- TP – Tanque Pulmão
- CV – Caixa Controladora de Vazão
- CG – Caixa de Gordura
- TS – Tanque séptico de fluxo ascendente
- FAS – Filtro aerado submerso
- BFM – Biofiltro misto
- Fluxo de tratamento

Fonte: A Autora, 2022.

Após o controle da vazão, há a caixa de gordura (CG), recomendada sempre que o efluente possuir resíduos gordurosos (ABNT, 1999). Esta unidade é constituída por dois compartimentos, o primeiro sendo um cesto com furos onde os resíduos oleosos ficam retidos na parte superior e por baixo passa o efluente para o segundo compartimento, com a caixa de armazenamento do efluente (Figura 9). O volume da caixa de gordura do EE é de 54 L e seu material é de PVC (Policloreto de Vinila).

Figura 9 - Caixa de Gordura do EE: (A) Vista externa e (B) vista por dentro com detalhe da gordura.



Fonte: A Autora, 2022.

3.2.2. Tratamento Primário

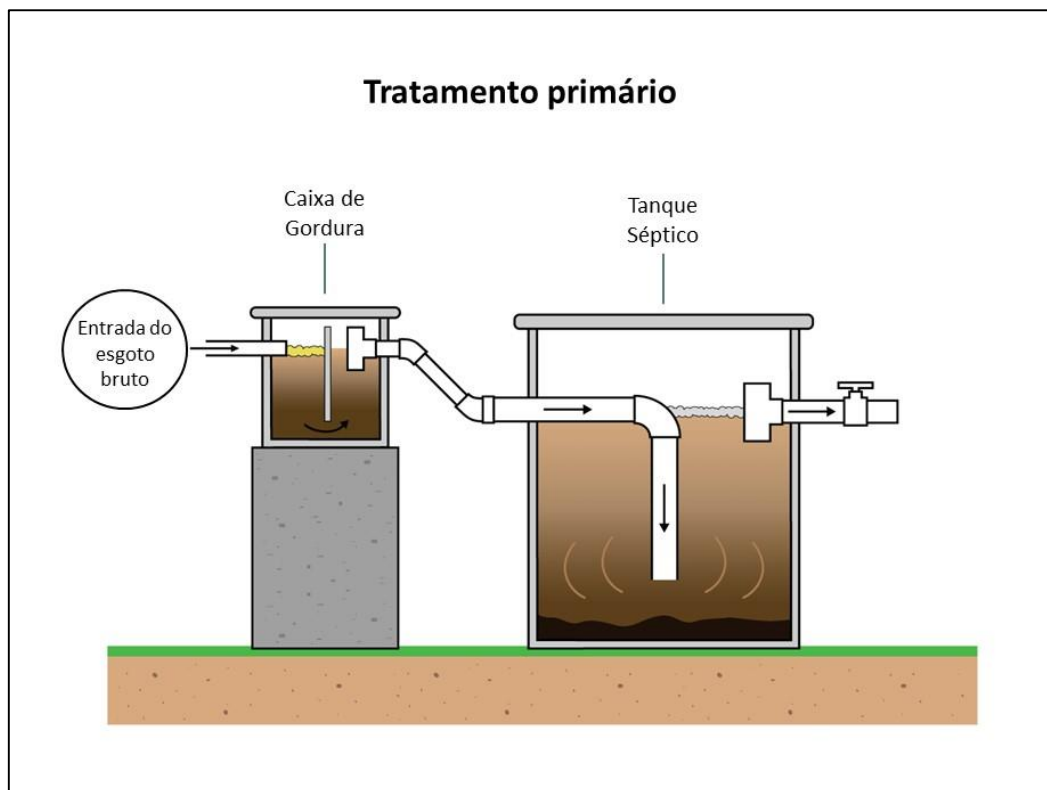
A etapa de tratamento primário do EE é constituída por um tanque séptico de fluxo ascendente (TS), que recebe o efluente após a caixa de gordura, o esgoto entra por uma tubulação na parte inferior do tanque e depois de 24 horas de tempo de detenção hidráulica (TDH), o efluente do tanque segue de forma ascendente por uma tubulação para o próximo tanque de tratamento (Figura 10). Este tanque de fibra de vidro apresenta um volume de cerca de 1500 L e um formato cilíndrico. A ilustração da Caixa de Gordura e do Tanque Séptico do EE foram apresentados na Figura 11.

Figura 10 - Tanque Séptico do EE: (A) Vista externa e (B) Vista por dentro com detalhe para espuma na camada superior do tanque.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 11 - Representação gráfica do tratamento primário do EE: caixa de gordura e tanque séptico.



Fonte: A Autora, 2022.

A remoção do lodo formado no TS deve ser feita no intervalo de um ano e sua disposição final ser realizada no leito de secagem, composto por uma caixa plástica com drenagem no fundo e tijolos para reter a parte sólida do lodo, instalado no CEADS (Figura 12).

Figura 12 - Fotografia do leito de secagem instalado no CEADS.



Fonte: A Autora, 2022.

3.2.3. Tratamento Secundário

O tratamento secundário do EE foi composto por filtro biológico aeróbio ascendente (FAS) seguido do biofiltro misto (BFM), responsáveis pela redução da carga orgânica e dos sólidos sedimentáveis.

O filtro biológico aeróbio ascendente foi constituído por um tanque cilíndrico contendo material de enchimento - meio suporte de mídias plásticas corrugadas - e uma mangueira porosa para aeração do efluente (Figura 13). O Tempo de detenção hidráulica (TDH) foi de 23 horas, seguindo de forma ascendente por uma tubulação para o próximo tanque de tratamento. Este tanque de fibra de vidro apresentou um volume aproximado de 1500 L e um formato cilíndrico.

Figura 13 - Filtro Aerado Submerso do EE: (A) Vista externa com a bomba de ar e (B) Vista por dentro com detalhe da formação das bolhas de ar.



Fonte: A Autora, 2022.

O último tanque da primeira linha de tratamento foi o biofiltro misto, sendo este, constituído de um tanque cilíndrico com base cônica contendo material de enchimento de argila expandida (Figura 14). O afluente chega ao tanque pela parte superior e é direcionado para o fundo, onde de forma ascendente percola o material filtrante até o ponto de coleta num TDH de 18,5 horas. O seu volume foi de 1250 L, sendo construído com fibra de vidro.

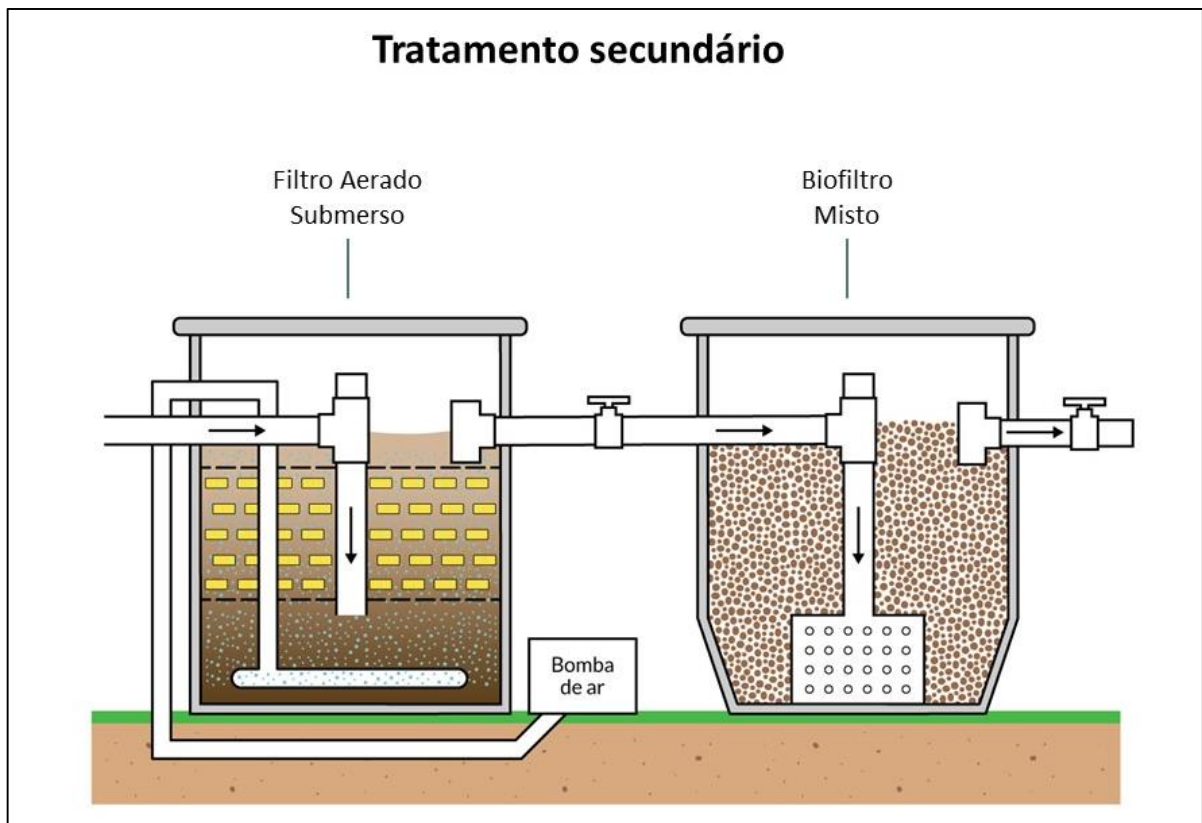
A representação gráfica do tratamento secundário do EE foi apresentada na Figura 15.

Figura 14 - Biofiltro Misto do EE: (A) Vista externa e (B) Vista por dentro com detalhe do meio filtrante (argila expandida).



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 15 - Representação gráfica do tratamento secundário do EE: filtro aerado submerso e biofiltro misto.



Fonte: A Autora, 2022.

3.2.4. Tratamento Terciário

A última etapa do tratamento do EE foi composta por 3 WCs intercalado com um tanque de algas. A disposição final do efluente tratado foi feita em um filtro de areia que deságua em um WC.

No primeiro WC foi utilizado uma macrófita flutuante, *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) – Aguapé com fluxo superficial sem meio suporte. O TDH é de 13,1 horas (Figura 16).

O segundo tanque foi o de algas, constituído por chicanas verticais para garantir uma maior retenção das algas e aumentar o TDH. Este tanque originalmente não possuía meio suporte e possuía o fluxo superficial, no entanto, na última camada foram inseridas britas nº1 para diminuir a passagem das algas para o tanque seguinte. O TDH foi de 10,7 horas (Figura 17).

Os dois últimos WCs foram plantados com *Typha domingensis* (Typhaceae) – Taboa (Figura 18) e gramíneas (Figura 19), respectivamente. Ambos possuem macrófitas aquáticas, apresentaram fluxo subsuperficial e foram preenchidos com material filtrante tipo brita nº1. O TDH do tanque de Taboa foi de 4,3 horas e o de Gramíneas de 2,4 horas.

Todos os tanques de WCs apresentavam um volume de 927 L, sendo construídos com fibra de vidro. A representação gráfica do tratamento terciário do EE está apresentada na Figura 20.

Figura 16 - WC de Aguapé do EE.



Figura 17 - Tanque de Algas do EE.



Figura 18 - WC de Taboa do EE.

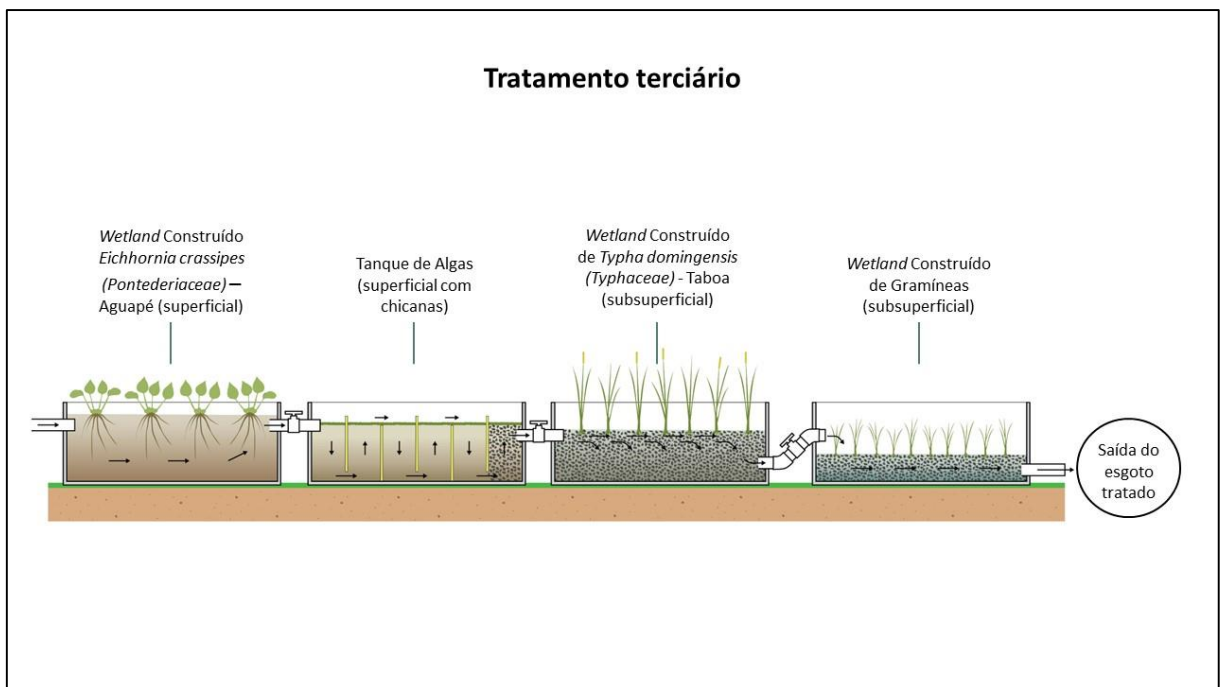


Figura 19 - WC de Gramíneas do EE.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 20 - Representação gráfica do tratamento terciário do EE: WC de Aguapé + TA + WC de Taboa + WC de Gramíneas.

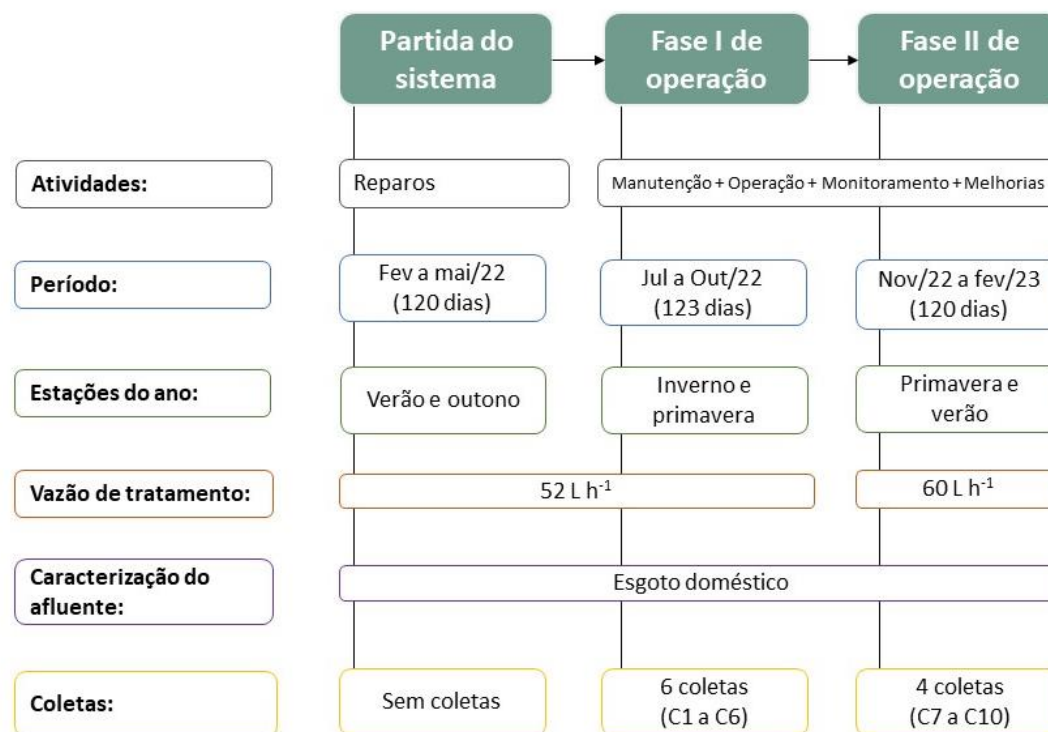


Fonte: A Autora, 2022.

3.3. Procedimento Experimental

O procedimento experimental seguiu três etapas (Partida do sistema, Fase I de operação e Fase II de operação), expostas no fluxograma da Figura 21.

Figura 21 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.



Fonte: A Autora, 2023.

3.3.1. Partida do sistema

No início da operação (fevereiro/22) foram detectados diversos problemas, decorrentes da falta de manutenção, como tubulações quebradas, entupimento da tubulação de alimentação, motobomba quebrada etc. Muitos problemas foram somatizados devido à falta de acesso ao sistema, por conta da pandemia de COVID-19. Devido a essas questões iniciais, a vazão afluyente apresentou variações significativas, afetando a estabilidade dos reatores e, conseqüentemente, o período de partida foi prolongado em 4 meses, além do previsto inicialmente que seriam 2 meses.

Foram tomadas diversas medidas corretivas que permitiram ao sistema alcançar um equilíbrio operacional, no entanto, ainda com um certo grau de dificuldade. A partida do sistema aconteceu no mês de março/22 com alimentação de esgoto doméstico na entrada do EE.

Nos tanques biológicos optou-se por aguardar que os microrganismos presentes no lodo e no próprio esgoto fizessem o reequilíbrio da biota de tratamento. Enquanto nos tanques de WCs foram replantadas algumas macrófitas.

Após 120 dias de operação (fevereiro a maio/22), o EE já havia recebido diversas melhorias e estava entrando na fase I de operação. Este período inicial ainda foi prolongado em função dos deslizamentos ocorrido na estrada de acesso ao CEADS causando o seu bloqueio total por mais de 20 dias em razão de fortes chuvas do mês de abril de 2022 (416 mm de chuva em 4 dias).

3.3.2. Fases I e II de Operação

O estudo foi desenvolvido em duas fases de operação (I e II), cada uma caracterizou-se pelas cargas orgânicas aplicadas devido à contribuição da geração dos efluentes. A fase I foi determinada por um esgoto doméstico com características expressivas de água cinza (águas residuárias do chuveiro, lavanderia, lavatórios e cozinha), devido à menor frequência de pesquisadores e alunos e conseqüentemente menor contribuição das instalações sanitárias (vaso sanitário). Já a fase II apresentou um efluente com características mais fortes de esgoto domésticos (águas cinzas + águas negras: vaso sanitário), com uma carga orgânica mais elevada. Ambas as fases tiveram influência da diluição dos efluentes por conta da baixa frequência de alunos e pesquisadores e também das fortes chuvas, além da intermitência na alimentação e aeração devido as recorrentes quedas na energia elétrica.

3.3.3. Gestão Operacional do EE

A gestão operacional do EE foi realizada pela equipe do grupo de pesquisa BIOTEMA e por funcionários do CEADS e contemplou a sua operação e manutenção (MASSOUD et al., 2009). Esta etapa foi de suma importância para que o sistema descentralizado tivesse um bom funcionamento e alcançasse os padrões de qualidade esperados.

Dois tipos de manutenção foram aplicados neste estudo: a manutenção geral e a específica.

A manutenção geral incluiu atividades recorrentes, como a inspeção do sistema para verificar o funcionamento da bomba, do quadro de luz, o fluxo da vazão, se havia entupimentos ou colmatações nos tanques e o manejo das macrófitas dos WCs, com uma frequência mensal. Já com uma frequência bimestral, ocorreu à limpeza da caixa de gordura.

Na Figura 22 tem-se o antes e depois da manutenção dos tanques de WCs. No WC1 de aguapé foi feita a marcação da metade do tanque e retirada do equivalente de macrófitas, no WC2 de taboa foi feita a poda acima de 80 cm da base da planta em todo o tanque e no WC3 de gramíneas foi feita a poda na altura do tanque.

A manutenção específica incluiu atividades particulares de cada tanque, que tinham uma frequência pontual. Como a manutenção da bomba, a substituição da mangueira de aeração do FAS e o manejo do lodo do TS.

Figura 22 – Manutenção Geral do EE: (A) Retirada de metade do Aguapé do WC1; (B) Poda da Taboa do WC2; (C) Poda das gramíneas do WC3 e (D) Manutenção da caixa de gordura.



Fonte: A Autora, 2022.

3.3.4. Monitoramento do sistema

A avaliação do desempenho do EE foi realizada com monitoramento feito em saídas de campo mensais, totalizando 10 campanhas (C1 a C10) entre julho/22 e fevereiro/23 com análises em 8 pontos de amostragem (efluente bruto e 7 efluentes de cada unidade de tratamento). Na fase I foram realizadas as 6 primeiras campanhas e na fase II foram realizadas as 4 últimas.

Os parâmetros analisados foram divididos em 5 grandes grupos:

- Nos 8 pontos: Oxigênio Dissolvido (OD), pH, Temperatura, Condutividade Elétrica (CE), Turbidez, Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Sólidos Suspensos Totais (SST), Demanda Química de Oxigênio (DQO), segundo metodologias disponíveis em APHA (2017) e a estimativa da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) seguindo a relação 2:1 de DQO:DBO;
- Em 5 pontos (T1, T3, T4, T6, T8): Série Amoniacal e Fósforo Total - Kits de análises Hach aprovados por USEPA. Na série Amoniacal foram analisadas as formas de nitrogênio: Amônia (kit TNT 832), Nitrito (kit TNT 839) e Nitrato kit TNT 835). Já o Fósforo Total foi analisado pelo kit TNT 845;

- Em 2 pontos (T1 e T8): Coliformes Termotolerantes (CTer) e Sólidos Sedimentáveis (SSed) segundo metodologias disponíveis em APHA (2017);
- Em 2 pontos (T1 e T8): Foram analisados qualitativamente por Cromatografia líquida um grupo de 12 compostos farmacêuticos, hormônios e aditivos plásticos (Carbamazepina, Ibuprofeno, Sulfametoxazol, Trimetoprim, Levonorgestrel, 17 alfa etinilestradiol, 17 beta-estradiol, Estrona, Benzofenona, Dietilftalato, Bisfenol A, Bisfenol S,) segundo método de microextração líquido-líquido dispersiva (MELLD) otimizado, desenvolvido por Coutinho (2020);
- Em 2 pontos (T1 e T8): Ensaio de toxicologia aquática - toxicidade crônica -com método de ensaio com microalgas (*Chlophycea*) segundo NBR 12.648/2018 (ABNT, 2018).

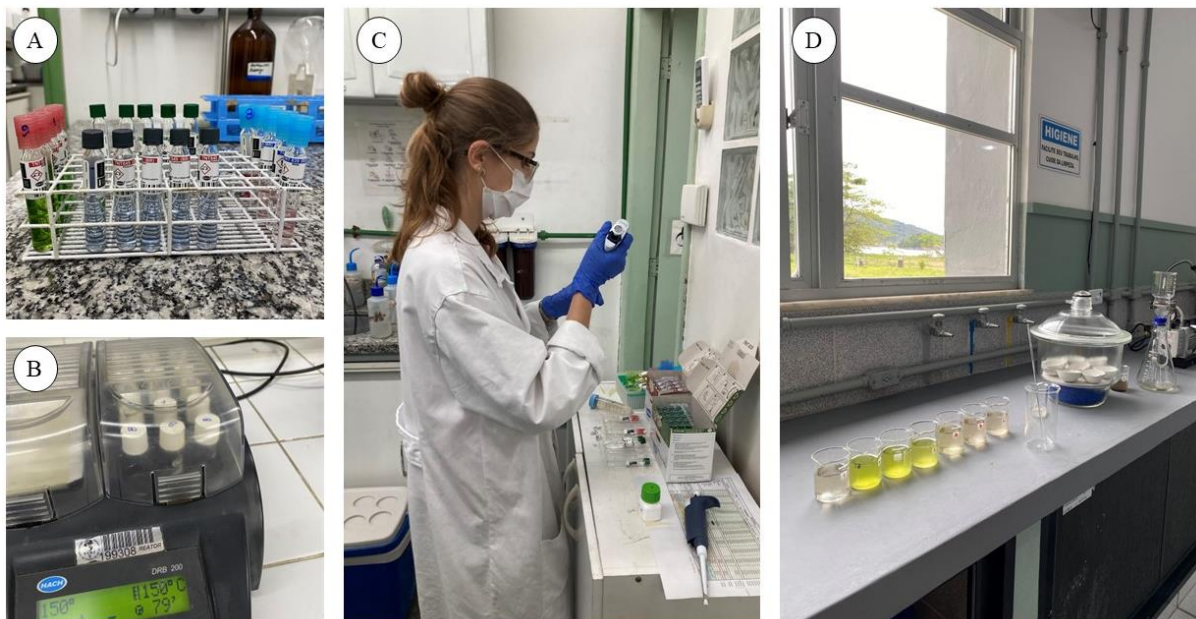
As análises de pH, SDT, Temperatura, Condutividade, Turbidez aconteceram *in situ* com o uso da sonda multiparamétrica - Horiba U-50. O parâmetro de OD foi analisado com sonda específica - Hach – HQ3d (Figura 23). Os outros parâmetros foram analisados em laboratório, como SST sendo feito no laboratório do CEADS e os demais, amônia, nitrito, nitrato, fósforo, DQO, Cromatografia e ensaio de toxicologia foram feitos no laboratório da UERJ – LABIFI, somente o parâmetro de coliformes fecais foi realizado em laboratório particular (Figura 24). As etapas de coleta e preservação das amostras seguiram as recomendações do Guia nacional de coleta e preservação de amostras da CETESB (2011).

Figura 23 - Sondas utilizadas na pesquisa: (A) Sonda multiparamétrica da Horiba - U-50 e (B) Sonda de OD da Hach – HQ3d.



Fonte: A Autora, 2022.

Figura 24 - Análises realizadas nos laboratórios do CEADS e da UERJ (LABIFI): (A) Tubos das análises de nutrientes (amônia, nitrito, nitrato e fósforo), (B) Digestor para DQO, (C) Preparação das análises de nutrientes e (D) Aparatados de filtração para a análise de SST.

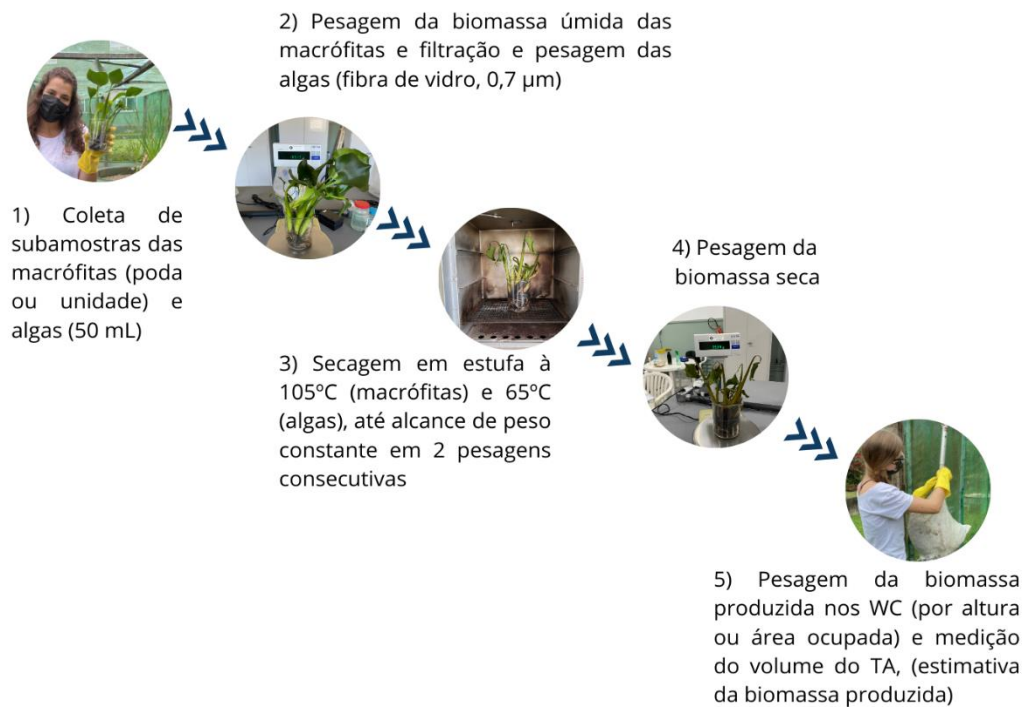


Fonte: A Autora, 2022.

3.3.4.1. Biomassa Seca

A determinação da biomassa seca produzida pelos tanques de WC e de algas foi realizada em 5 passos (Figura 25)

Figura 25 - Avaliação da biomassa produzida nos WCs e no TA.



Fonte: A Autora, 2022.

- 1) Coleta de subamostras das macrófitas (poda ou unidade) e algas (50 mL);
- 2) Pesagem da biomassa úmida das macrófitas e filtração (com filtro de fibra de vidro de 0,7 μm) com pesagem das algas;
- 3) Secagem em estufa à 105°C (macrófitas) e 65°C (algas), até que fosse atingido peso constante em 2 pesagens consecutivas;
- 4) Pesagem biomassa seca; e
- 5) Pesagem total da biomassa produzida nos tanques WC (por altura ou área ocupada) e medição do volume do tanque de algas, para estimativa da biomassa produzida no período.

A contribuição dos WCs e do TA para a redução da carga orgânica e dos nutrientes (C, N e P) foi avaliada baseada na metodologia proposta por SALOMÃO et al. (2012) e nas taxas de incorporação de biomassa apresentadas na literatura para cada macrófita, considerando a contribuição conjunta dos tanques: WC1+TA e WC2+WC3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Partida do sistema

Durante os anos de 2020 e 2021 o EE ficou sem alimentação regular, ou seja, vazão zero de entrada de efluente, e teve a sua operação e manutenção prejudicadas, devido às restrições impostas pela pandemia de COVID-19. Dessa forma, o sistema precisou passar por uma série de manutenções para voltar a funcionar com a sua plena capacidade.

Nos meses de fevereiro/22 a maio/22 foram feitos diversos reparos no EE, como a retirada de plantas invasoras, substituição de tubulações quebradas, pintura do sistema, troca da caixa de gordura, reposição das macrófitas (Taboa) e de britas no WC2 e o conserto da motobomba (Figura 26). Após essas reformas iniciais, o sistema estava novamente com as condições necessárias para entrar na fase de operação.

Figura 26 - Fotografias das reformas para partida do Ecosistema Engenheirado. (A) Remoção das plantas invasoras e troca das tubulações quebradas com uma noção do antes e depois; (B) Reposição da Taboa e adição de brita no WC2; (C) Sistema pintado e com a nova caixa de gordura.



Fonte: A Autora, 2022.

4.2. Fase I de operação

Reconhecidamente, os processos operacionais de tratamento de esgotos são complexos (MORAES et al. 2020), mesmo em se tratando de unidades simplificadas, nomeadamente em sistemas descentralizados. A condução da pesquisa, embora tenha apresentado diversos problemas operacionais, foi conduzida com todo o rigor metodológico e está descrita aqui em detalhes. Todos os acontecimentos foram extremamente relevantes, tanto para o entendimento das dificuldades que acompanham o trabalho de operação e manutenção, como para registrar, em métodos científicos, o retrato real da gestão operacional desse tipo de sistema, que nem sempre são descritos na literatura.

A fase I de operação contemplou da primeira (C1) – julho/22 à sexta coleta (C6) – outubro/22 e teve uma vazão de tratamento de 52 L h^{-1} (1248 L dia^{-1}). Neste período, as atividades do CEADS ainda estavam retornando à normalidade, tendo como média de frequentadores mensais 108 pessoas, com um mínimo de 52 contribuintes mês^{-1} e um máximo de 173 contribuintes mês^{-1} .

Durante a fase I de operação foram iniciadas as campanhas de coleta das amostras de cada tanque para verificação do desempenho do tratamento do sistema e ainda foram realizados alguns reparos e melhorias ao longo da gestão operacional.

Na terceira coleta (C3) em agosto/22, foi verificada que a motobomba não estava funcionando e que o sistema ficou cerca de 15 dias sem receber alimentação. Foi feito o reparo corretivo deste equipamento e ele voltou a funcionar, tendo assim o retorno da entrada de efluente no EE.

Após ser verificado que as concentrações de OD estavam abaixo do esperado – C4 (setembro/22) - foi construída e adicionada uma nova estrutura de mangueira porosa no sistema de aeração do FAS, a fim de promover uma melhoria nos processos aeróbios de tratamento. Além disso, as mídias plásticas (meio suporte para filtração) tinham se dispersado no tanque e foram colocadas dentro do seu compartimento, a fim de melhorar as condições para o crescimento do biofilme microbiano nos meios suportes plásticos (Figura 27).

Figura 27 - Reparos feitos no Filtro Aerado Submerso. (A) Estrutura de Mangueiras porosas; (B) Mídias plásticas; (C) Tanque em pleno funcionamento.

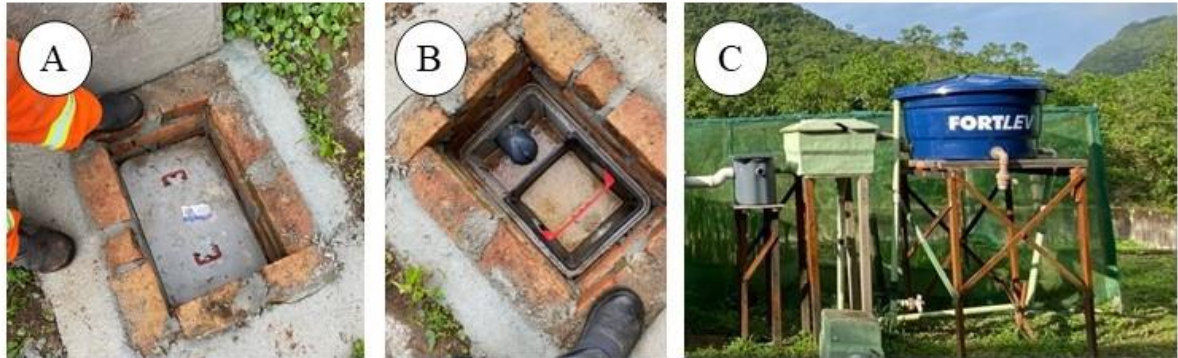


Fonte: A Autora, 2022.

Na quinta coleta (C5), no final de setembro/22, a motobomba estava sem funcionar mais uma vez e foi identificado que a caixa de gordura do CEADS, que recebia águas residuais da cozinha e do tanque da lavanderia, estava sem a devida conexão e esses efluentes estavam indo direto para a elevatória. Por conta disso, diversos resíduos gordurosos e restos de comida estavam passando direto e danificando a motobomba. Verificou-se então, a necessidade de realizar a troca deste equipamento e de suas ligações.

A fim de garantir uma maior vida útil aos equipamentos e melhorar a eficiência de tratamento do EE, foi feita a instalação da nova motobomba e de um novo temporizador de 40 ciclos (20 *ON* e 20 *OFF*). Também foi realizada a troca da caixa de gordura do CEADS (Figura 28a e b) na sexta coleta (C6) em outubro/22. Além disso, foi realizada a troca do tanque pulmão (Figura 28c), pois esta unidade estava apresentando obstruções na válvula de controle de saída do efluente a partir da formação de um biofilme, interferindo assim no controle da vazão de tratamento do sistema.

Figura 28 - Substituição do tanque pulmão do EE e da caixa de gordura do CEADS. (A) Nova caixa de gordura do CEADS fechada; (B) Nova caixa de gordura do CEADS aberta; (C) Em azul, novo tanque pulmão.



Fonte: A Autora, 2022.

Na última saída da primeira etapa de operação foi instalada uma caixa de areia (camada da base de brita + areia + alimentação com tubulação com furos espaçados) como polimento final utilizando materiais disponíveis no próprio local (Figura 29).

Figura 29 - Instalação da Caixa de Areia. (A) Processo de montagem e aproveitamento da areia de uma antiga caixa de areia e (B) Nova caixa de areia instalada.



Fonte: A Autora, 2022.

4.3. Fase II de operação

A fase II de operação contemplou da sétima (C7) – novembro/22 à décima coleta (C10) – fevereiro/23 e teve um pequeno ajuste na vazão para 60 L h^{-1} (1440 L dia^{-1}). Neste período, o CEADS ainda não tinha retornado a sua rotina normal, além de ter a influência do período de recesso do final do ano, tendo como média de frequentadores mensais $128 \text{ pessoas mês}^{-1}$, com mínimo de 67 e máximo de 198 contribuintes mês^{-1} .

Como melhoria final das etapas deste estudo, na décima coleta (C10) em fevereiro/23 foi feito o ajuste na mangueira de aerção do FAS e o manejo de aproximadamente $1/3$ do lodo do TS com disposição em leito de secagem (Figura 30).

Figura 30 - Manejo e disposição final do lodo do tanque séptico. (A) Retirada do lodo do tanque séptico com auxílio de uma peneira; (B) e (C) Disposição final do lodo no leito de secagem.



Fonte: A Autora, 2023.

4.4. Desempenho do Ecossistema Engenheirado

A análise dos dados foi feita por estatística descritiva e no seu tratamento foram excluídos alguns resultados devido a identificação de falhas analíticas nos experimentos por conta das adaptações nas rotinas dos laboratórios em retorno às atividades pós pandemia.

Na Tabela 2, foram apresentados os resultados das análises dos parâmetros, considerando todas as campanhas (C1 à C10) no período de julho/22 a fevereiro/23.

Tabela 2 - Desempenho do Ecossistema Engenheirado por parâmetros analisados de julho/22 a fevereiro/23 (C1 à C10).

Coletas	Parâmetros por Tanques de Tratamento							
	pH							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C1	6,4	6,8	6,5	6,8	6,2	6,9	6,9	7,1
C2	6,5	7,1	6,7	6,6	6,3	6,7		6,6
C3	6,5	6,5	7,1	7,8	7,4	7,2	8,0	6,5
C4	7,0	6,8	7,2	6,9	6,5	6,7	6,8	6,7
C5	5,7	5,8	7,0	6,3	6,3	6,6	6,3	QA
C6	5,8	6,7	6,5	7,0	6,6	6,8	6,8	6,1
C7	6,5	6,1	7,4	7,4	6,8	7,1	6,9	6,0
C8	6,8	7,1	8,0	8,1	7,8	8,2	7,9	7,3
C9	6,1	6,0	6,8	7,0	6,9	6,8	7,0	6,9
C10	6,5	6,3	7,2	7,0	6,9	7,2	7,1	7,0
Mediana	6,5	6,6	7,0	7,0	6,7	6,8	6,9	6,7
Coletas	Temperatura (°C)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
	C1	23,3	23,4	22,5	24,9	24,1	24,0	23,2
C2	20,0	21,1	21,4		20,4	20,0		20,6
C3	22,0	21,8	22,0	21,7	21,3	21,1	21,5	21,8
C4	20,4	19,5	19,7	19,4	19,1	19,0	19,4	20,0
C5	21,2	20,9	20,7	21,0	20,3	20,1	20,7	QA
C6	25,8	25,6	25,7	27,1	27,6	27,6	26,0	25,0
C7	25,2	24,5	25,2	25,8	24,0	23,9	23,9	23,7
C8	29,6	29,2	28,8	30,5	30,8	31,0	30,8	30,8
C9	30,3	30,7	29,3	32,7	29,7	29,2	29,8	27,2
C10	31,0	30,0	30,0	29,0	29,0	29,0	29,0	28,0
Mediana	24,2	24,0	23,9	25,8	24,1	23,9	23,9	24,7

Legenda:

atenderam a legislação

não atenderam a legislação

QA - Questões analíticas com alterações

Coletas	OD (mg L ⁻¹)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C1	0,3	0,3	4,1	QA	5,9	QA	2,6	2,8
C2	0,2	QA	8,0	QA	4,0	QA		2,6
C3	QA	0,2	4,5	0,5	2,9	2,9	3,2	2,9
C4	QA	QA	1,4	QA	2,0	2,8	3,0	2,6
C5	QA	QA	8,2	0,3	3,4	2,1	QA	QA
C6	0,2	0,3	5,1	0,3	3,1	QA	QA	QA
C7	QA	0,2	2,7	0,4	4,8	1,9	1,6	1,7
C8	0,1	0,2	QA	0,1	QA	1,7	1,8	1,7
C9	QA	0,1	QA	0,1	QA	0,1	0,1	0,1
C10	0,1	0,1	2,1	0,2	QA	1,8	2,2	1,9
Mediana	0,2	0,2	4,3	0,3	3,4	1,9	2,2	2,2
Coletas	DBO (mg L ⁻¹)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C5	223,5	152,8	79,7	82,5	63,0	65,9	80,9	QA
C7	162,5	487,2	58,6	66,4	50,6	52,2	45,3	67,2
C8	231,4	296,1	94,4	73,1	53,9	68,3	46,4	47,2
C9	356,1	482,5	QA	177,5	156,9	145,3	140,8	134,7
C10	186,0	279,4	73,9	59,7	44,7	38,6	38,9	30,3
Mediana	223,5	296,1	76,8	73,1	53,9	65,9	46,4	57,2
Coletas	Turbidez (NTU)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C1	122,0	99,9	QA	QA	QA	82,4	QA	21,4
C2	121,0	21,3	QA	42,8	QA	36,3	QA	13,2
C3	365,0	191,0	164,0	91,0	19,5	47,1	QA	QA
C4	345,0	185,0	278,0	244,0	99,6	44,0	44,8	27,4
C5	573,0	QA	QA	47,8	QA	18,2	QA	QA
C6	264,0	212,0	49,9	29,8	24,1	164,0	171,0	QA
C7	228,0	QA	60,8	69,5	47,2	72,7	52,8	29,8
C8	332,0	QA	185,0	123,0	68,3	103,0	41,1	27,2
C9	213,0	324,0	178,0	139,0	121,0	136,0	112,0	QA
C10	242,0	69,4	151,0	115,0	66,6	54,4	49,0	41,6
Mediana	253,0	185,0	164,0	91,0	66,6	63,6	50,9	27,3
Coletas	SST (mg L ⁻¹)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C4	108,0	346,0	110,0	120,0	95,6	44,0	14,5	10,0
C7	112,0	466,0	33,3	39,0	47,0	32,5	19,0	13,0
C8	135,7	637,5	124,5	73,0	68,0	90,0	31,5	23,0
C9	148,0	135,7	115,0	102,0	96,0	120,0	QA	46,0
C10	126,7	238,3	QA	23,6	20,5	QA	9,5	5,5
Mediana	126,7	346,0	112,5	73,0	68,0	67,0	16,8	13,0

Legenda:

atenderam a legislação

não atenderam a legislação

QA - Questões analíticas com alterações

Coletas	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C1	473,0	571,0	416,0	360,0	223,4	202,5	203,6	176,5
C2	850,0	523,0	457,0	462,0	198,3	239,3	QA	259,6
C3	692,0	815,0	607,0	625,0	424,0	387,0	375,0	353,0
C4	490,0	762,0	844,0	804,0	655,0	600,0	547,0	504,0
C5	1420,0	1420,0	1300,0	1140,0	882,0	942,0	939,0	QA
C6	519,0	673,0	538,0	553,0	375,0	154,0	178,0	207,0
C7	474,0	212,0	575,0	592,0	509,0	509,0	478,0	519,0
C8	1480,0	1480,0	1440,0	1500,0	1400,0	QA	1360,0	QA
C9	880,0	749,0	689,0	641,0	653,0	645,0	625,0	646,0
C10	812,0	639,0	617,0	691,0	658,0	648,0	639,0	622,0
Mediana	752,0	711,0	612,0	633,0	581,0	509,0	547,0	428,5
Coletas	SDT (mg L^{-1})							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C2	417,0	256,0	224,0	227,0	97,0	117,0	QA	127,0
C3	443,0	543,0	408,0	400,0	276,0	252,0	244,0	230,0
C4	328,0	502,0	540,0	524,0	430,0	384,0	350,0	322,0
C5	909,0	908,0	833,0	728,0	565,0	603,0	600,0	QA
C6	332,0	431,0	344,0	354,0	242,0	100,0	116,0	135,0
C7	308,0	338,0	368,0	379,0	326,0	326,0	311,0	332,0
C8	948,0	946,0	924,0	959,0	899,0	QA	873,0	QA
C9	563,0	479,0	441,0	410,0	418,0	413,0	400,0	414,0
C10	520,0	409,0	395,0	442,0	421,0	415,0	409,0	398,0
Mediana	443,0	479,0	408,0	410,0	418,0	355,0	375,0	322,0
Coletas	Amônia ($\text{mg L}^{-1} \text{NH}_3^-$)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C6	27,3		18,8	QA		19,3		QA
C7	32,8		35,9	36,6		45,2		20,1
C8	33,1		38,2	45,8		44,1		41,4
C9	43,9		39,4	QA		54,4		42,1
C10	30,9		47,4	52,3		QA		41,4
Mediana	32,8		38,2	45,8		44,7		41,4
Coletas	Nitrito ($\text{mg L}^{-1} \text{NO}_2^-$)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C6	QA		0,03	0,02		QA		QA
C7	0,02		0,06	0,03		0,05		0,51
C8	0,07		0,07	0,02		0,04		0,56
C9	0,07		0,05	0,05		0,04		QA
C10	0,02		0,05	QA		0,03		0,21
Mediana	0,05		0,05	0,02		0,04		0,51

Legenda:

atenderam a legislação

não atenderam a legislação

QA - Questões analíticas com alterações

Coletas	Nitrato (mg L ⁻¹ NO ₃ -)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C6	0,68		QA	QA		QA		QA
C7	0,50		0,43	0,50		0,29		3,27
C8	0,48		0,40	0,36		0,43		2,79
C9	0,62		0,43	0,45		QA		QA
C10	0,38		0,39	0,44		0,53		3,48
Mediana	0,50		0,42	0,44		0,43		3,27

Coletas	Fósforo (mg L ⁻¹ PO ₄)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C7	9,67		14,00	15,60		13,10		15,30
C8	15,60		17,20	19,50		19,10		17,10
C9	20,60		18,20	21,30		22,50		24,40
C10	15,10		18,20	19,30		20,10		15,30
Mediana	15,35		17,70	19,40		19,60		16,20

Coletas	Ssed (mg L ⁻¹)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C8	<1							<1
C9	<1							<1
C10	<1							<1
Mediana	<1							<1

Coletas	Coliformes Termotolerantes - CTer (NMP 100 mL ⁻¹)							
	BR (1)	FS (2)	FAS (3)	BFM (4)	WC1 (5)	TA (6)	WC2 (7)	WC3 (8)
C7	160000,0							230,0
C8	160000,0							13000,0
C10	160000,0							92000,0
Mediana	160000,00							13000,00

Legenda:

atenderam a legislação não atenderam a legislação QA - Questões analíticas com alterações

Fonte: A Autora, 2023.

Para analisar a eficiência do tratamento do EE e a conformidade com a legislação vigente, foram utilizados os critérios e padrões da NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021), os quais já foram previamente mencionados na Revisão Bibliográfica (Item 2.2).

Os valores de pH se mantiveram estáveis e próximos da neutralidade ao longo de todos os tanques, sem a necessidade de ajustes ou correções. Esse parâmetro é importante para o controle operacional, a fim de garantir que os processos biológicos (digestão anaeróbica, processos oxidativos e aeróbios) aconteçam de forma satisfatória (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Segundo Hussar & Bastos (2008) e Sooknah & Wilkie (2004), ambientes com pH na

faixa de 7,2 a 9,6 são propícios para o desenvolvimento das bactérias nitrificantes, enquanto na faixa de 6,5 a 7,5 há a predominância das bactérias desnitrificantes. No EE, o FAS apresentou nas campanhas C4, C7, C8 e C10 pH acima de 7,2, favorecendo a nitrificação, nos demais tanques houve a predominância de pH menor que 7,0, comportamento semelhante ao estudo de Salomão (2010). Além disso, os resultados de todas as coletas ficaram dentro do limite estabelecido pela legislação vigente - NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021).

A temperatura se manteve próxima a 24 °C em praticamente todos os tanques do EE, permanecendo dentro da faixa adotada pela norma brasileira – NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) de 16 a 30 °C para os esgotos domésticos. Este parâmetro é importante porque pode interferir na velocidade das reações químicas, no metabolismo bacteriano, além de exercer influência na solubilidade dos gases (DA-RIN, 2021). As temperaturas do EE ficaram em uma faixa considerada satisfatória, favorecendo o desempenho dos processos biológicos anaeróbios, com pouca interferência na solubilidade dos gases na água (SANTOS & VAN HAANDEL, 2019). O efluente final apresentou características semelhantes aos trabalhos de Salomão (2010) e Kaczala et al. (2005), além disso ficou dentro do limite estabelecido pela legislação vigente em todas as coletas, garantindo que a temperatura não tenha provocado modificações na biota do corpo receptor.

Realizar o monitoramento do parâmetro de Oxigênio Dissolvido (OD) foi de suma importância para manutenção da vida aquática, além de ser usado para determinar o impacto dos poluentes presentes no efluente final sobre os corpos hídricos (ARAÚJO et al., 2004). As taxas mínimas esperadas em sistemas de tratamento de esgoto com unidades aeróbias são de 3 mg L⁻¹ (HIRAKAWA et al. 2002), 2 mg L⁻¹ (ARAÚJO et al., 2009) ou 1,5 a 4,0 mg L⁻¹ (METCALF & EDDY, 2016), para verificação dos processos oxidativos da matéria orgânica e para os processos de nitrificação nas unidades de tratamento (COLMENAREJO et al., 2006).

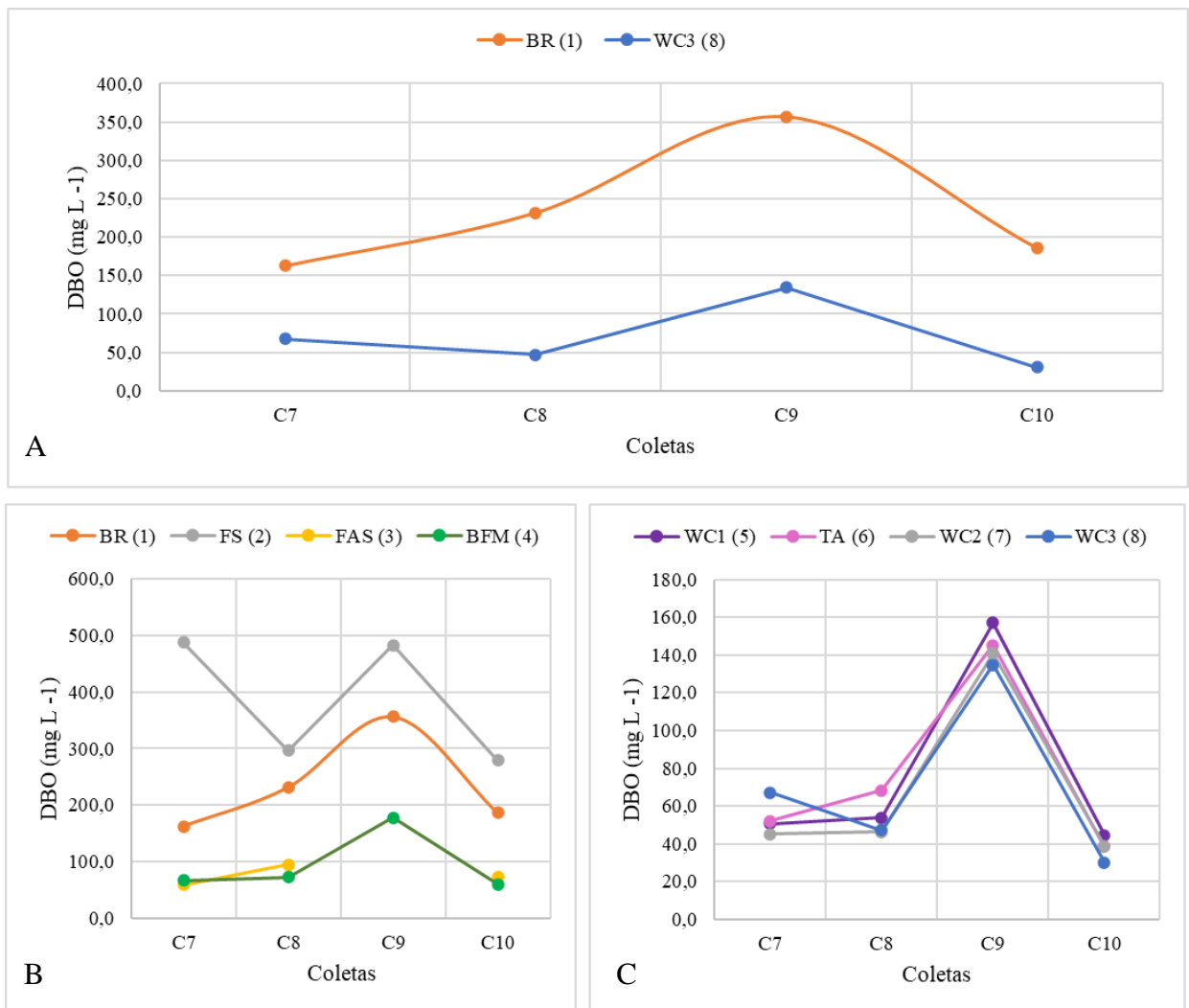
O efluente bruto e o FS neste estudo tiveram baixas taxas de OD (< 1 mg L⁻¹), se comportando como unidades anaeróbias conforme o esperado pela NBR 13.969/1997 (ABNT, 1997). Já o FAS apresentou taxas satisfatórias de OD para o desenvolvimento das bactérias aeróbias e favorecimento da nitrificação, com mediana de 4,3 mg L⁻¹ (ARAÚJO et al., 2009). Nos WCs, os resultados atestam que há presença de OD remanescente, fruto da presença das macrófitas (SOOKNAH & WILKIE, 2004).

Pode-se observar que com melhores taxas de OD, há uma redução da DBO (VON SPERLING, 2014). No EE isso ficou claro no FAS, na décima coleta, onde a concentração de OD foi de 2,1 mg L⁻¹ e teve com uma redução de 60% da DBO neste tanque. A redução da DBO no sistema alcançou a eficiência global esperada na maioria das campanhas (Figura 31),

ficando um pouco acima do encontrado por Salomão (2010), mas dentro dos resultados de Almeida et al. (2007). A maior eficiência de redução de DBO foi obtida pelo sistema na linha 1 (convencional), sendo este de 68%, já com a contribuição dos WCs (linha 2) foi possível alcançar os 84% de redução da DBO. Esses resultados atestam o ganho de eficiência no tratamento com os WCs (KACZALA et al. 2005).

Diante disso, verificou-se que a DBO ficou em conformidade em 4 dos 5 resultados, ficando fora somente 12% do padrão estabelecido pela legislação vigente - NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021), acredita-se que isso ocorreu devido ao aumento do número de contribuintes do CEADS (oscilação na frequência dos usuários) o que alterou a carga orgânica afluyente.

Figura 31 – Gráfico de DBO de cada unidade de tratamento: (A) Entrada e saída do efluente, (B) Linha 1 e (C) Linha 2.



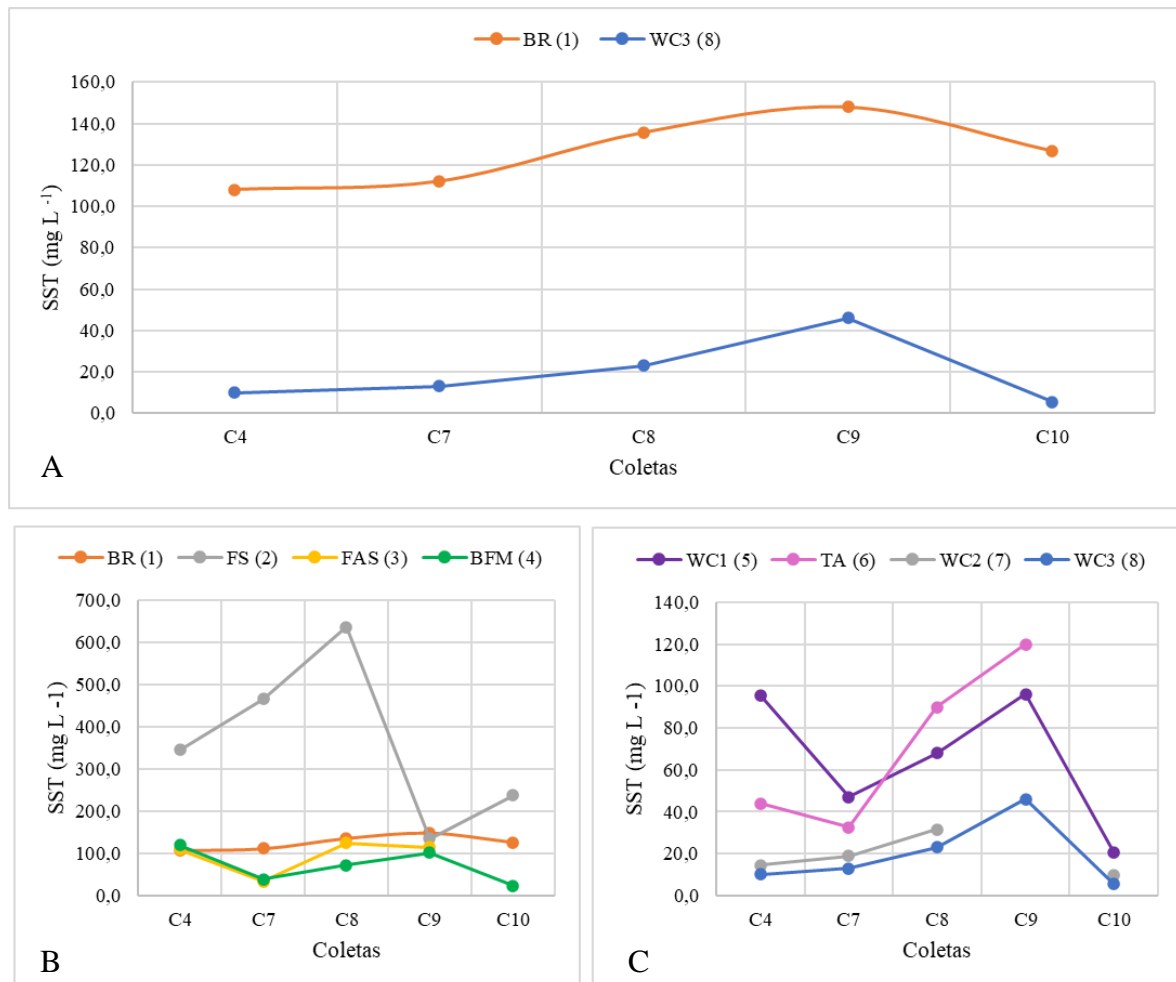
Fonte: A Autora, 2023.

Foi monitorada também a eficiência na remoção dos sólidos em suspensão, parâmetro importante de ser avaliado por ser o principal componente que carrega matéria orgânica e outros poluentes nos esgotos domésticos (VON SPERLING, 2014). A redução dos Sólidos Suspensos Totais (SST) ao longo de cada unidade de tratamento mostrou-se bastante satisfatória em todas as campanhas (Figura 32), semelhante aos estudos de Calheiros et al. (2007) e Sooknah & Wilki (2004). Apesar da proliferação das algas e seu transporte para outros tanques, mesmo com britas na última chicana, teve-se uma excelente remoção deste parâmetro no EE como aconteceu com Salomão (2010).

A maior eficiência de redução de SST foi alcançada na última coleta, com a linha 1 tendo reduzido 81%, já com a contribuição dos WCs, foi possível alcançar uma redução de 96%. Todas as coletas obtiveram resultado abaixo de 46 mg L^{-1} no efluente final, ficando dentro do padrão estabelecido pela legislação vigente - NOP INEA nº 45/2021(RIO DE JANEIRO, 2021).

A turbidez é um parâmetro físico importante, tanto visual, como indicador da presença de poluentes orgânicos e inorgânicos, além de sinalizar riscos a entupimentos e colmatações nos sistemas de tratamento (VON SPERLING, 2014) É um dado que está diretamente relacionado a presença dos SST e partículas coloidais (JOAQUIN et al., 2022), isso pode ser comprovado com a redução dos valores de turbidez conforme o SST foi removido em cada tanque do EE. Os valores de turbidez variaram na faixa de 13,2 a 41,6 NTU, tendo como mediana 27,3 NTU, retrato da influência da remoção do SST e de alguns períodos de fortes chuvas que influenciaram no valor da turbidez no efluente final.

Figura 32 - Gráfico de SST de cada unidade de tratamento: (A) Entrada e saída do efluente, (B) Linha 1 e (C) Linha 2.



Fonte: A Autora, 2023.

Os sólidos dissolvidos representam o conjunto de substâncias orgânicas e inorgânicas na forma molecular e ionizada nos líquidos (JORDÃO & PESSÔA, 2017). A remoção dos SDT no EE foi insatisfatória, corroborando com o comportamento encontrado por Salomão (2010), que teve valores médios de 317 mg L^{-1} no seu efluente final. A melhor remoção de SDT foi na primeira coleta, com 127 mg L^{-1} e pior resultado na nona, com 414 mg L^{-1} , no primeiro caso, provavelmente em razão da grande contribuição das águas cinzas no sistema, o que diluiu o efluente, e no segundo, possivelmente devido à falta de estabilização do biofilme no FAS por conta da intermitência de energia elétrica.

Já os sólidos sedimentáveis (SSed) foram medidos na entrada e na saída do EE. Todas as amostras ficaram com concentração $<1 \text{ mg L}^{-1}$, garantindo o cumprimento da legislação vigente - NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021).

A Condutividade Elétrica (CE) expressa a habilidade de uma solução aquosa transportar corrente elétrica indicando a quantidade de sais existentes, íons dissolvidos em água, podendo ser associada diretamente aos SDT (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Durante o monitoramento do EE, os valores de CE variaram bastante e não reduziram de forma satisfatória, apresentando resultados melhores na fase I de operação, ficando na faixa de 176 a $646 \mu\text{S cm}^{-1}$. Esse comportamento também foi relatado por Salomão (2010) com $616 \mu\text{S cm}^{-1}$ e Freitas (2011) com $535 \mu\text{S cm}^{-1}$ no efluente final. Pode-se observar que houve uma diminuição da CE nos WCs, indicando uma maior capacidade de absorção de íons dissolvidos pelas macrófitas, no entanto, houve um aumento no TA devido a proliferação das algas. Apesar de não terem reduzidos os valores de CE, não há nenhuma regulação que limite esse padrão para o lançamento de esgotos domésticos em corpos hídricos.

O nitrogênio e o fósforo são elementos presentes nos esgotos sanitários essenciais para o crescimento dos microrganismos responsáveis pelo tratamento do esgoto, mas em altas concentrações podem gerar prejuízos ambientais. São provenientes dos próprios excrementos humanos, mas atualmente têm fontes importantes nos produtos de limpeza domésticos, como detergentes e amaciantes de roupas (VON SPERLING, 2014).

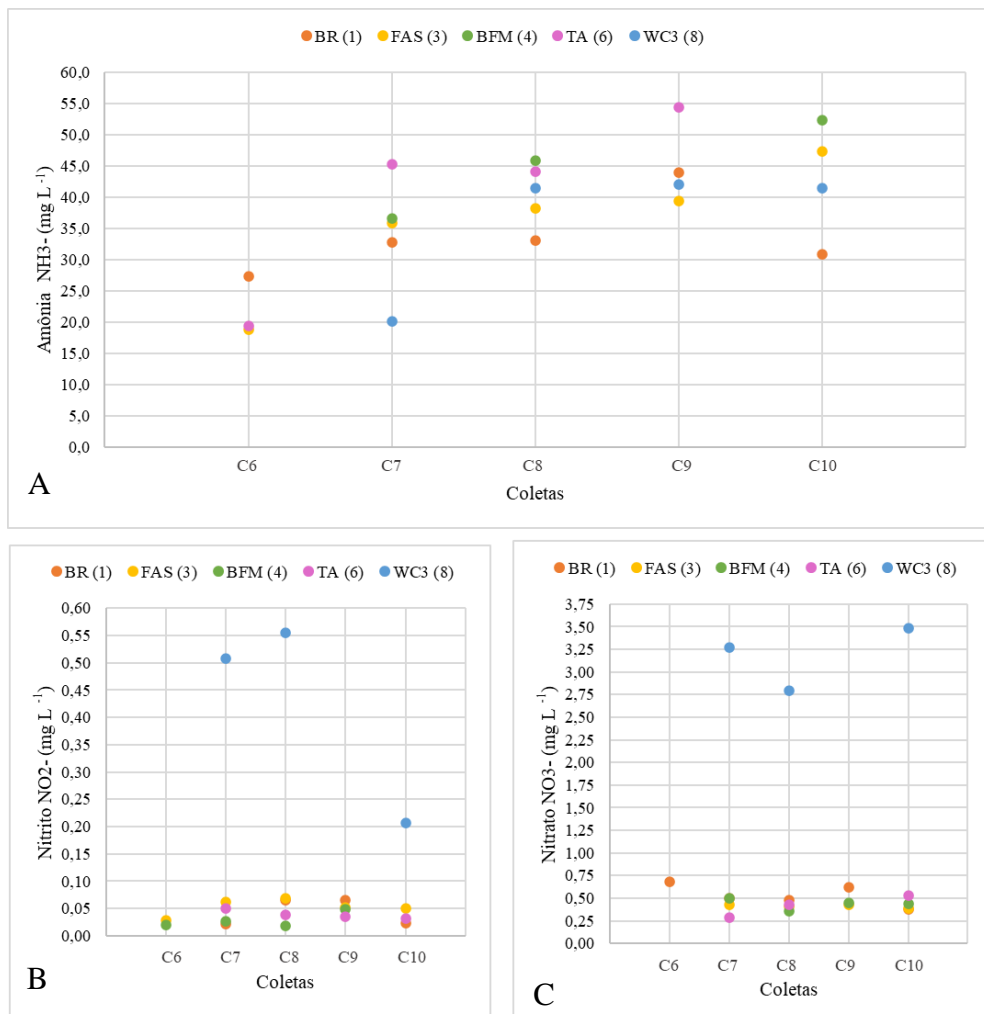
A concentração da amônia típica de esgotos brutos é de 20 a 35 mg L^{-1} (VON SPERLING, 2006), sendo a mesma faixa encontrada ao longo do período de monitoramento do EE na entrada do sistema. Observou-se baixas taxas de remoção deste composto nas unidades de tratamento (Figura 33), indicando que os processos de nitrificação e desnitrificação não estavam acontecendo conforme o esperado.

Alguns fatores podem ter interferido no desempenho do EE, como as condições climáticas com fortes chuvas que diluíam o esgoto e as recorrentes quedas de energia, que

deixavam o EE sem alimentação e sem aeração no FAS, limitando as atividades aeróbias, principalmente a nitrificação e oxidação da matéria orgânica. Comportamento semelhante foi verificado por Freitas (2011) e Colmenarejo et al. (2006), já no trabalho de Salomão (2010), um sistema equivalente apresentou resultados satisfatórios nos processos de nitrificação e desnitrificação, devido as concentrações ideais de OD e tempo de contato adequado no FAS para promoção da nitrificação.

Ainda na Figura 33, é possível verificar graficamente o comportamento das concentrações de nitrito e nitrato no EE, esses parâmetros permaneceram muito baixos em todas as campanhas, indicando que os processos de nitrificação e desnitrificação não ocorreram de forma satisfatória, como sinalizado pelas altas concentrações de amônia nos tanques. Esse resultado mostrou uma deficiência no sistema, já que os trabalhos de Salomão (2010), Freitas (2011) e Kaczala et al. (2005) apresentaram sistemas semelhantes com uma boa eficiência na remoção de nitrogênio.

Figura 33 - Gráfico de (A) Amônia, (B) Nitrito e (C) Nitrato das unidades BR, FAZ, BFM, TA e WC3.



Diante disso, somente um resultado do efluente final ficou em conformidade com a legislação vigente, com $20 \text{ mg NH}_3^- \text{ L}^{-1}$, os demais ficaram na faixa de $40 \text{ mg NH}_3^- \text{ L}^{-1}$, fora dos limites estabelecidos pela NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021), sendo necessário fazer um ajuste no sistema, como a instalação de placas solares para garantir uma maior autonomia elétrica e permitir que a alimentação e aeração permaneçam constantes, provocando o aumento do tempo de permanência do líquido em contato com o oxigênio, possibilitando um desenvolvimento maior e aumento das atividades dos organismos nitrificantes (ARAÚJO et al., 2009).

O fósforo é outro composto presente nos esgotos domésticos e se apresenta principalmente nas formas de ortofosfatos, polifosfato e fósforo orgânico. É um nutriente essencial para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica, no entanto, se for lançado no meio ambiente em altas concentrações pode causar eutrofização dos corpos hídricos (VON SPERLING, 2014). Devido as diferentes formas, a remoção do fósforo ainda é um grande desafio para os sistemas biológicos (KAVANAGH & KELLER, 2007).

Ao longo dos processos de tratamento não houve variações significativas de remoção do fósforo total nas unidades do sistema, tendo taxas de 15,30 a $24,4 \text{ mg L}^{-1}$ no efluente final. As principais rotas de remoção deste composto no EE seriam predominantemente pela biomassa aderida no FAS, pelas macrófitas dos WCs e pelas algas, como apresentado por Salomão (2010). No entanto, a utilização de produtos de limpeza no CEADS sem a correta diluição e com altas concentrações de fósforo, podem ter influenciado as altas concentrações do afluente do sistema (esgoto bruto).

Estudos como os de Salomão (2010); Kaczala et al. (2005) e Freitas (2011) também relataram o baixo desempenho de sistemas biológicos para remoção desse composto em sistemas semelhantes, sendo improvável garantir o alcance das concentrações estabelecidas pela legislação vigente, por ser um parâmetro muito restritivo (VOLSCHAN JR, 2021). Diante disso, o efluente final não alcançou os padrões de lançamento da legislação vigente - NOP INEA nº 45/2021 (RIO DE JANEIRO, 2021), sendo necessário um ajuste no sistema, com o emprego de uma tecnologia de tratamento específica para remoção de fósforo.

Além das características físicas e químicas previamente discutidas, as características biológicas dos efluentes tratados são de grande importância para o controle de doenças causadas por microrganismos patogênicos de origem humana. Os principais compostos encontrados no esgoto doméstico bruto são bactérias, vírus, fungos, protozoários, helmintos, algas, entre outros (METCALF & EDDY, 2016).

Os coliformes termotolerantes são encontrados no esgoto em torno de 10^8 NMP 100 mL⁻¹, em um efluente com redução de 90%, encontra-se cerca de 10^7 NMP 100 mL⁻¹, e por sua vez um efluente com 99% de redução obtém-se em média 10^6 NMP 100 mL⁻¹ (JORDÃO & PESSÔA, 2017). A análise de coliformes é de extrema importância para promoção da prática de reúso de água, tendo em vista a elevada carga patogênica presente no esgoto (ARAÚJO, 2019). Com isso, para diminuir o risco de contaminação, as legislações de reúso, balizaram-se estabelecendo limites mais ou menos restritivos de acordo com a aplicação de reúso da água.

Segundo Jordão & Pessôa (2017), a redução dos patógenos obtida em diferentes tipos de unidade de tratamento, é relativamente desprezível, uma vez que os tratamentos secundários, ainda que reduzam de 90 a 99% de coliformes, ainda mantém um efluente com considerável densidade de organismos.

A remoção desses microrganismos é realizada majoritariamente por processos de tratamento químicos ou biológicos. O nível de tratamento secundário apresenta uma eficiência relativamente elevada para remoção de carga orgânica e nutrientes, no entanto, em termos de densidade de organismos patogênicos, se mostra pouco eficiente quanto a sua redução. Dessa forma, recomenda-se a desinfecção do efluente para reduzir as taxas de CTer, favorecendo menores riscos à saúde pública e a proteção ambiental.

A eficiência de remoção dos coliformes termotolerantes foi medida em 4 campanhas, na entrada e na saída do EE. O melhor resultado apresentou uma redução de 99,9% de CTer na saída do tratamento, com $2,3E+02$ NMP 100 mL⁻¹, seguido da coleta com 91,9% ($1,3E+04$ NMP 100 mL⁻¹), já nas coletas 6 e 10 a redução foi de 42,5% ($9,2E+04$ NMP 100 mL⁻¹). Esses resultados estão dentro da faixa estipulada pela literatura, já as recomendações para aplicação do reúso de água serão abordadas no capítulo em sequência.

Os processos físicos, químicos e microbiológicos contribuem para a redução das concentrações de matéria orgânica e de nutrientes em WCs, sendo uma parcela exclusivamente reduzida pela produção de biomassa das macrófitas e das algas (SALOMÃO et al., 2012). Na Tabela 3 foi apresentado o balanço de massa dos WCs e TA, para os três constituintes envolvidos no estudo (carbono, nitrogênio e fósforo), removidos exclusivamente por macrófitas e algas, por outros mecanismos e a soma entre eles (redução total).

Tabela 3 - Balanço de massa (C, N e P) dos Wetlands Construídos (WC) e Tanque de Algas (TA) do EE.

Unidade de Tratamento do EE	Área (m ²)	Taxa de crescimento da biomassa seca (g.m ⁻² .dia ⁻¹)	Taxa incorporação de acordo com a literatura (mg.g ⁻¹)	Redução pelas macrófitas (g.m ⁻² .dia ⁻¹)	Redução por outros processos (g.m ⁻² .dia ⁻¹)	Redução total (g.m ⁻² .dia ⁻¹)	
WC1 - <i>E. crassipes</i> - Aguapé n = 10	2,06	20,06	C	425	8,53	0,04	8,56
			N	42,8	0,86	-0,23	0,63
			P	6,5	0,13	-0,09	0,04
TA - Algas n = 5	2,06	0,66	C	800	0,53	-0,33	0,20
			N	150	0,10	1,16	1,26
			P	20	0,01	0,06	0,07
WC2 - <i>T.domingensis</i> - Taboa n = 7	2,06	3,05	C	396	1,21	2,80	4,01
			N	14,6	0,04	0,34	0,39
			P	2,6	0,01	0,10	0,11
WC3 - Gramíneas n = 4	2,06	0,35	C	410	0,14	-0,14	0,00
			N	23,7	0,01	0,77	0,78
			P	5,7	0,00	0,22	0,22
Biomassa total	8,24	24,12	C	-	10,41	2,37	12,78
			N	-	1,01	2,05	3,06
			P	-	0,15	0,28	0,44

Legenda: n= número de análises. Fonte: A Autora, 2023.

A maior taxa de crescimento da biomassa foi do tanque de *Eichhornia crassipes* (Aguapé) - WC1, com 20,06 g.m⁻² dia⁻¹. O crescimento nitidamente mais rápido desta macrófita ocorreu devido a sua capacidade maior de assimilação e de estocagem dos nutrientes dissolvidos no efluente, além da contribuição da sua raiz alongada (LIMA, 2005).

Para o caso da matéria orgânica, a colaboração conjunta dos tanques de WCs e TA para redução de DBO foi de 26,3 g dia⁻¹; para o Nitrogênio Total foi de 6,3 g dia⁻¹ e para o Fósforo Total, 0,90 g dia⁻¹. A contribuição atribuída ao crescimento da biomassa foi maior no caso da matéria orgânica carbonácea, enquanto a remoção atribuída a outros mecanismos se fez mais presente em relação aos nutrientes. A unidade de tratamento que apresentou a maior contribuição para redução da carga orgânica (C) e dos nutrientes (N e P) foi o WC1, *E. crassipes* (Aguapé).

Vale destacar que os tanques de WCs e TA em conjunto possuem uma área superficial total de $8,2 \text{ m}^2$ (WC1+TA+WC2+WC3) e foram responsáveis por uma taxa média de crescimento de biomassa de $24,12 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Além disso, a absorção total pela biomassa foi de $10,41 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $1,01 \text{ g N m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, $0,15 \text{ g P m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

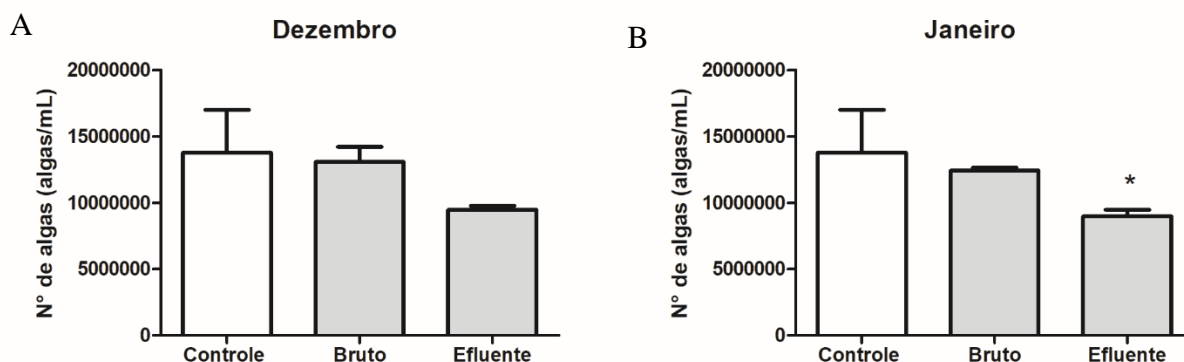
A participação das macrófitas no processo de tratamento de esgotos mostrou-se ser essencial para a retenção de poluentes, uma vez que desempenharam o papel de absorção e fixação de carbono e de nutrientes na biomassa produzida. O desempenho do EE em relação às taxas de remoção, no estudo de Salomão et al. (2012) foi superior ao do estudo em questão, isto se deu, principalmente, em função da periodicidade menor de poda das macrófitas, já que o período para atingimento do ponto de saturação das plantas é na faixa de 14 e 21 dias, após as taxas de absorção diminuem (ESTEVEZ, 1998). Dessa forma, recomenda-se que o intervalo de poda seja reduzido para ter uma contribuição ainda melhor das plantas dos WCs.

Ainda na verificação da eficiência de tratamento do EE, foi realizado o teste de toxicidade no tanques de entrada e saída. Sabe-se que os testes de toxicidade são ótimas ferramentas para avaliar a qualidade da água, tendo em vista que, somente a verificação parâmetros físico-químicos e microbiológicos não seriam capazes de diferenciar as substâncias que afetam os seres vivos daquelas que são inertes no meio (COSTA et al., 2008). No Brasil ainda há poucos estudos de toxicidade em efluentes domésticos e não há uma regulamentação que estabeleça padrões e critérios para os graus permissíveis de toxicidade para o lançamento dos efluentes.

Apesar da eficiência da remoção dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos exibidos anteriormente, o efluente final do EE apresentou um certo grau de toxicidade crônica (inibição de crescimento da biomassa de algas) ao final do tratamento para o mês de janeiro de 2023 (35%) (Figura 34). Isto aconteceu devido a processos de biotransformação dos compostos presentes no efluente que em determinadas condições podem gerar compostos tóxicos (BARSZCZ et al., 2019). Além disso, a toxicidade pode estar relacionada com a DBO e DQO, pois compostos orgânicos e metais podem conferir toxicidade ao efluente (COSTA et al., 2008). Com alcance gradual da estabilidade do EE, espera-se que o grau de toxicidade seja reduzido, o que ainda não foi possível devido a todas as adversidades enfrentadas.

Os resultados da toxicidade se mostrou muito relevante, pois apontou que mesmo o efluente tratado enquadrado com os padrões de lançamento, pode apresentar grau de toxicidade. Com isso, este estudo contribuiu para apontar a necessidade da publicação de normas brasileiras que estabeleçam esses ensaios como um dos critérios para a disposição final dos efluentes tratados.

Figura 34 - Gráfico com a contagem de algas no ensaio de toxicidade crônica no EB e WC3. (A) Campanha de Dezembro/2022 e (B) Campanha de Janeiro/2023.



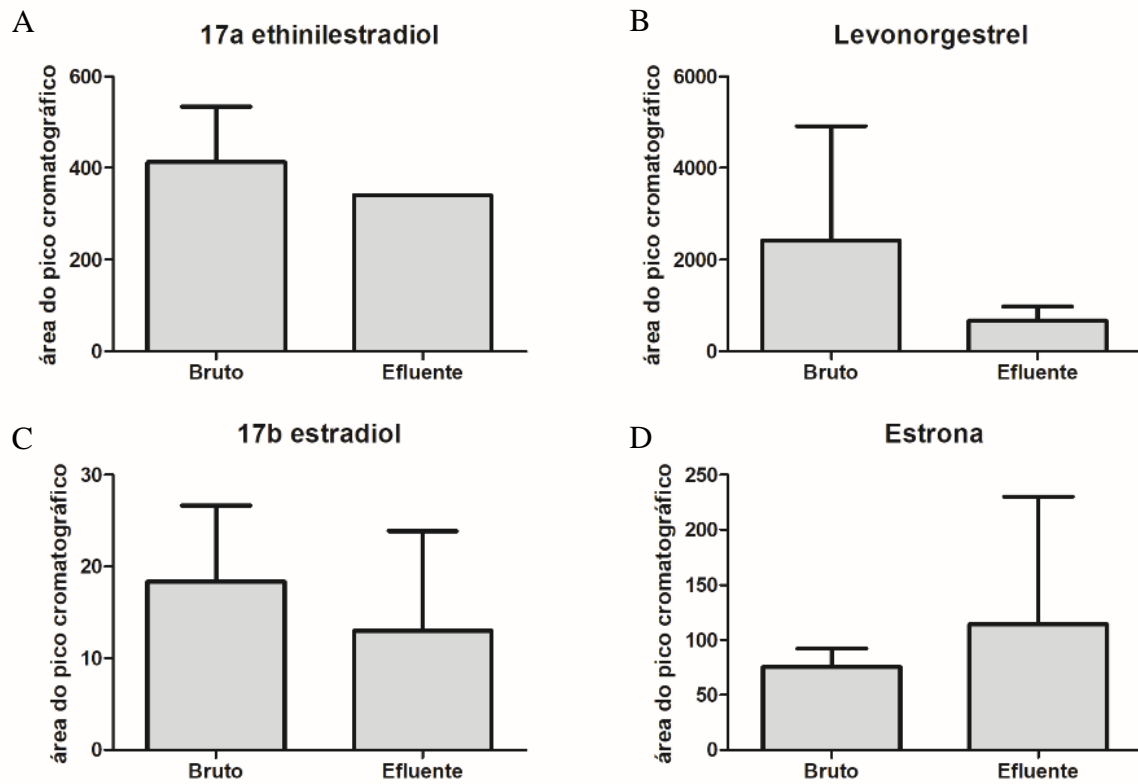
Fonte: A Autora, 2023.

Além dos compostos comumente presentes nos esgotos domésticos, novos produtos químicos são encontrados em baixas concentrações (ng L^{-1} a $\mu\text{g L}^{-1}$), chamados de poluentes emergentes e/ou micropoluentes (LUO et al., 2014). Esses produtos incluem itens farmacêuticos, produtos de higiene pessoal, desinfetantes, detergentes, plastificantes, corantes e tintas, surfactantes, pesticidas, conservantes de alimentos e outros aditivos (AVILA et al., 2014). Ao serem liberados no meio ambiente podem gerar riscos à saúde humana e ambiental, pois são capazes de causar efeitos adversos nos organismos, devido a capacidade de bioacumulação e de desregulação endócrina (FATTA-KASSINOS et al., 2010).

Uma forma de verificar a presença destes compostos no efluente é pela análise de cromatografia. Neste estudo foi realizada a análise qualitativa em cromatografia de 12 compostos, baseada em estabelecer o valor da área da banda cromatográfica. Quando a banda cromatográfica é registrada na forma de pico, a sua área pode ser calculada, como a área do triângulo isósceles.

A redução da área do pico cromatográfico dos hormônios (Figura 35) foi de 32 – 63%. O composto que apresentou maior redução da área foi o estrogênio natural na sua forma de estrona (63%) e o com menor redução foi o estrogênio sintético, o 17alfa ethinilestradiol (32%). Segundo Cunha et al. (2016), há uma eficiência maior na remoção e/ou degradação de estrogênios em ambientes aeróbios, quando comparado a anóxico ou anaeróbio nos sistemas de tratamento de esgotos. Dessa forma, o decaimento da estrona no EE pode ser associada as tecnologias utilizadas no sistema, como o filtro aerado submerso e os *Weltands* construídos (SONG et al., 2009).

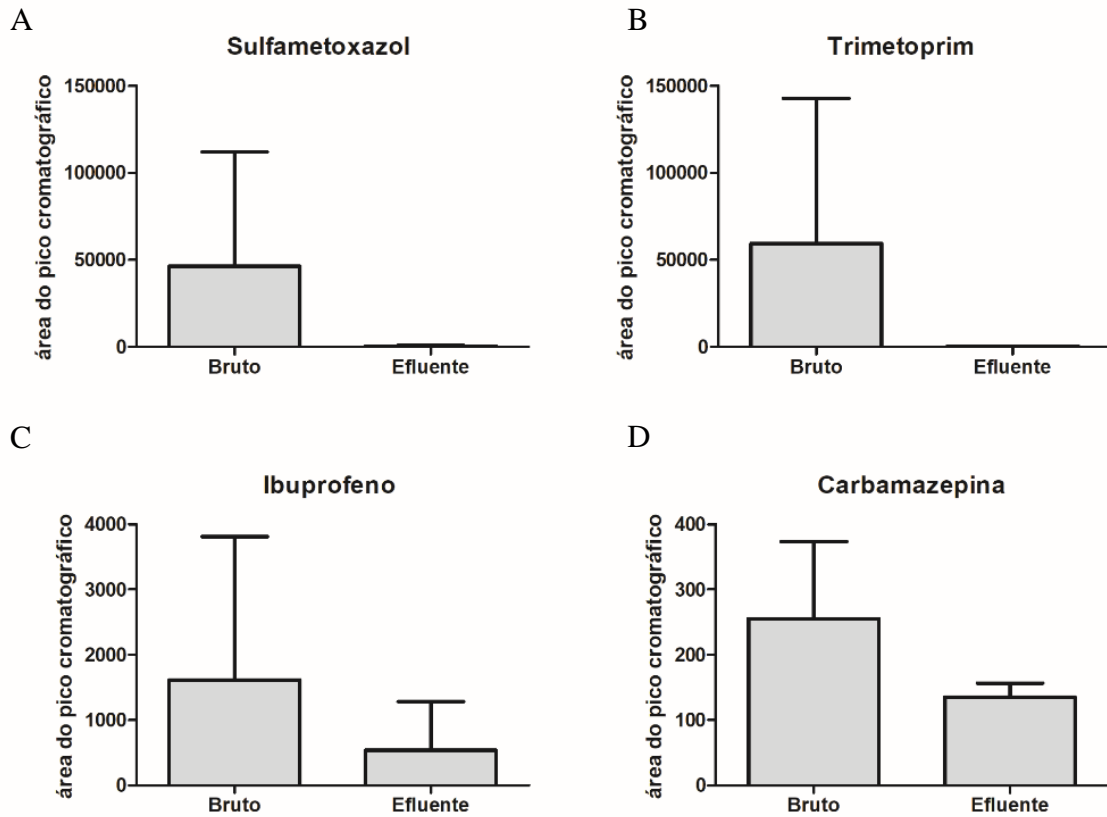
Figura 35 - Remoção de hormônios EE: (A) 17a ethinilestradiol (B) levonorgestrel (C) 17b estradiol (D) estrona.



Fonte: A Autora, 2023.

Os fármacos apresentaram a melhor redução de pico cromatográfico neste estudo em comparação aos outros compostos encontrados, na faixa de 43 – 99% (Figura 36). O maior decaimento da área foi do antibiótico sulfametoxazol (99%), apresentando um resultado melhor quando comparado ao estudo de Zhu & Chen (2014), onde duas ETes tiveram remoção de 33 – 41%, provavelmente devido a sua sorção e absorção no lodo, além da baixa biodegradação nestes sistemas, o que não aconteceu com o EE (BAUMGARTEN et al. 2011).

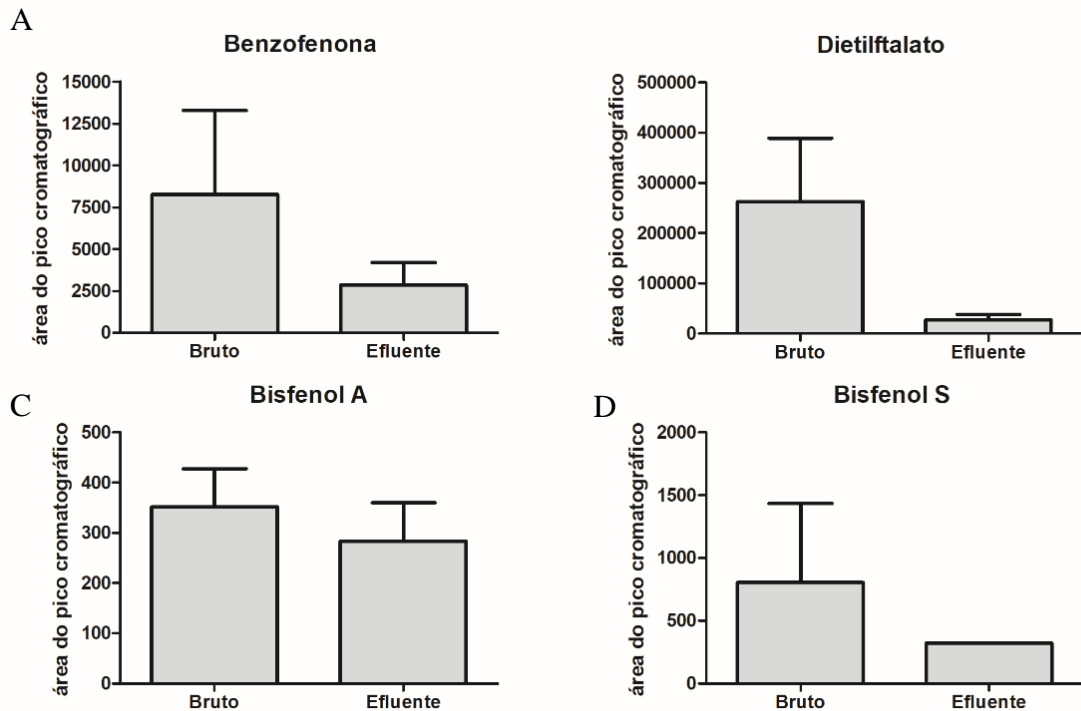
Figura 36 - Remoção de fármacos no EE: (A) Sulfametoxazol, (B) Trimetoprim, (C) Ibuprofeno, (D) Carbamazepina.



Fonte: A Autora, 2023.

Os compostos classificados como aditivos plásticos tiveram uma redução de pico cromatográfico na faixa de 42 – 87 % (Figura 37), sendo o dietilftalato o composto que apresentou a maior redução de área (87%), em razão de ser um composto menos recalcitrante em comparação aos demais (AMARAL, 2021). Este resultado corrobora com outros estudos que relatam que mecanismo de biodegradação é o responsável pela maior parcela de remoção total nos sistemas biológicos, tanto em condições aeróbias como anaeróbias (LIU et al., 2020; GANI & KAZMI, 2019). Mais uma vez, as linhas de tratamento do EE favoreceram a redução destes compostos emergentes.

Figura 37 - Remoção de aditivos plásticos no EE: (A) Benzofenona, (B) Dietilftalato, (C) Bisfenol A, (D) Bisfenol S.



Fonte: A Autora, 2023.

Diante dos resultados sobre os poluentes emergentes, a combinação do EE (tratamento convencional com soluções baseadas na natureza) se mostrou eficiente para o decaimento de diversos compostos. Este estudo revela a importância da identificação, quantificação e redução desses compostos nos efluentes, a fim de garantir a saúde humana e do meio ambiente. No entanto, no Brasil, ainda não há nenhum dispositivo legal ou normativo que aborde os poluentes emergentes nas águas residuais tratadas.

4.5. Propostas de reúso

As propostas de reúso de água precisam ser feitas de acordo com a qualidade do efluente final alcançado pelo sistema de tratamento, de modo que cada tipo de reúso demanda uma determinada qualidade de água (SANTOS & LIMA, 2022). Para garantir a segurança da prática, se faz necessário alcançar os padrões, critérios e diretrizes estabelecidos pelos documentos reguladores vigentes, conforme apresentado na Revisão Bibliográfica deste trabalho (Item 2).

Na Tabela 4 têm-se alguns padrões de qualidade do efluente final do EE em 3 campanhas de monitoramento: a coleta 7 foi realizada em novembro/22, a coleta 8 em dezembro/22 e a coleta 10 em fevereiro/23.

Tabela 4 - Qualidade do efluente final do EE nas coletas 7, 8 e 10.

Nº da Coleta	Coliformes Termotolerantes (NMP 100 mL ⁻¹)	DBO (mg L ⁻¹)	Turbidez (NTU)
C7	2,3E+02	67,22	29,80
C8	1,3E+04	47,22	27,20
C10	9,2E+04	30,28	41,60

Fonte: A Autora, 2023.

Como no Estado do Rio de Janeiro, local em que este trabalho foi desenvolvido, não há um regulamento com critérios e padrões de reúso, as propostas serão feitas em relação à qualidade final encontrada, o enquadramento com os regulamentos vigentes em outros locais e a vocação para reúso da água na área de estudo.

A qualidade do efluente da coleta C7 se enquadrou com alguns usos previstos pelas legislações da Bahia, Ceará, Rio Grande do Sul e Minas Gerais:

- **Bahia (Resolução CONERH nº 75/2010)** - reúso na irrigação, inclusive hidroponia, de produtos alimentícios não consumidos crus e não alimentícios, forrageiras, pastagens, árvores, revegetação e recuperação de áreas degradadas;
- **Ceará (Resolução COEMA nº 02/20171)** - reúso urbano (exceto irrigação paisagística) e ambiental;
- **Rio Grande do Sul (Resolução CONSEMA nº 419/2020)** - reúso urbano classe B: irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito, abatimento de poeira, construção civil, ETEs e desobstrução de tubulações e agrícola/florestal: irrigação de qualquer cultura, exceto frutos, hortaliças, raízes e tubérculos com contato direto com o solo ou com a água para consumo humano na forma crua;
- **Minas Gerais (Deliberação Normativa CERH nº 65/2020)** - Agrossilvipastoril amplo: fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão. Agrossilvipastoril limitado: fertirrigação superficial ou localizada, evitando contato da água de reúso com o produto alimentício. Urbano amplo: lavagem de pátios, logradouros ou outros com exposição similar; lavagem de veículos comuns; descargas sanitárias. Urbano limitado: lavagem de veículos especiais e externa de trens e aviões, controle de poeira, combate a incêndio, desobstrução de galerias.

A qualidade do efluente nas campanhas C8 e C10 foi inferior, em termos dos critérios para reúso. Dessa forma, o efluente final se enquadrou em alguns usos previstos somente pela legislação de Minas Gerais:

- **Minas Gerais (Deliberação Normativa CERH nº 65/2020):** Agrossilvipastoril limitado: fertirrigação superficial ou localizada, evitando contato da água de reúso com o produto alimentício e Urbano limitado: Desobstrução de galerias.

Diante desses resultados, foi possível perceber que quanto melhor a qualidade do efluente final mais aplicações para o reúso da água são permitidas. Tendo em vista que o EE está localizado em uma região insular, sem escassez hídrica, as propostas de reúso precisam estar alinhadas com a vocação local, pois além da ausência de um instrumento regulador não há o incentivo por meio de políticas públicas para o reúso nesta região.

Pelas características do EE, entende-se que as propostas de reúso se fazem muito preliminar, sendo necessário uma abordagem mais completa. Uma opção é a aplicação do modelo Semiquantitativo de Avaliação de Risco Microbiológico (ASqRM) para saúde humana, que aborda o conceito *fit-for-purpose* (ajustado à proposta), o qual envolve a produção de água de reúso, com a qualidade adequada às necessidades dos usuários finais (LIMA et al., 2022).

Com essa metodologia, é possível combinar barreiras físicas, químicas ou biológicas, a fim de garantir que o risco seja minimizado. Essas barreiras equivalem a uma medida de controle que produz um resultado que elimina ou reduz o perigo – presença de microrganismos (Coliformes termotolerantes ou *Escherichia coli*) – a um nível aceitável (APA, 2019). Isso significa que águas com uma densidade inadequada de microrganismos para determinado uso, podem ficar adequadas pela implantação de uma ou mais barreiras equivalentes (LIMA et al., 2021).

Damaceno et al. (2022), utilizou a ASqRM para reúso na irrigação de duas culturas – cana de açúcar e pastagem – com aplicação de efluentes tratados com presença de *E. coli* de $3,8 \times 10^4$, $1,1 \times 10^6$, $2,6 \times 10^5$ e $1,4 \times 10^6$ CFU 100mL⁻¹. Os valores máximos indicados nas diretrizes não mandatórias da OMS (2006) e Interáguas (2017) para o padrão de coliformes para água de reúso na agricultura são mais restritivos do que a densidade presente na aplicação deste estudo. No entanto, houve um nível de risco aceitável para todos os receptores. Esses riscos podem ser reduzidos a desprezíveis se melhorias no sistema de tratamento de águas residuais e configurações mais eficientes de barreiras forem adotados. Um cenário muito semelhante ao do EE, validando assim, a relevância do uso da metodologia de ASqRM.

Diante disso, a avaliação de riscos possibilita uma melhor gestão do sistema, trazendo informações sobre os diversos cenários para a tomada de decisões, além de estimular a confiança da população na aplicação segura do reúso de água (DAMACENO et al., 2022).

4.6. Manual do Ecossistema Engenheirado

Foi desenvolvido como um dos produtos desta pesquisa o Manual do Ecossistema Engenheirado, cuja capa e contracapa estão na Figura 38. Este material contém informações educativas sobre o que é o esgoto, o que é recomendado descartar nas instalações hidrossanitárias, informações sobre as etapas de tratamento do EE com detalhes construtivos, de funcionamento, de manutenção e algumas considerações. Com isso, será possível aumentar a divulgação desta tecnologia e permitir maior replicação em diferentes regiões em desenvolvimento do planeta.

Este documento não está disponível neste trabalho, pois está em processo de publicação.

Figura 38 – Capa (A) e contracapa (B) do manual do EE.



Fonte: A Autora, 2023.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho de pesquisa avaliou o desempenho do sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos, EE, instalado no CEADS da UERJ localizado na Ilha Grande – RJ para disposição final adequada e/ou aproveitamento do efluente tratado. Sendo assim, conclui-se que o EE alcançou eficiência satisfatória na redução da matéria orgânica, sólidos em suspensão e coliformes termotolerantes, estando dentro dos padrões de lançamento estabelecidos na NOP INEA nº 45/2021 na maioria dos parâmetros avaliados (pH, T, DBO, SST, Ssed), estando fora apenas os parâmetros de N-amoniaco e fósforo total.

Em relação aos compostos emergentes a análise qualitativa, dos poluentes selecionados, demonstrou que o conjunto de tecnologias aplicadas no EE foi capaz de reduzir a área do pico cromatográfico em até 99%, sendo que para os hormônios 32 – 63%, para os aditivos plásticos foi de 42 – 87% e para os fármacos essa redução foi de 43 – 99%. O composto que apresentou maior redução foi o Sulfametoxazol (99%) e o que apresentou menor redução foi o 17 α etinilestradiol (32%). Tais resultados ainda precisam de uma análise qualitativa para a determinação final das concentrações de lançamentos de cada um destes compostos, no entanto, com os resultados obtidos já é possível observar uma grande contribuição do sistema para a remoção/biodegradação destes compostos, reduzindo sua entrada no meio ambiente.

Em relação aos bioensaios de toxicidade crônica com as microalgas (*C. vulgaris*) foi possível concluir que o sistema ainda apresentou toxicidade (inibição de crescimento da biomassa de algas) ao final do tratamento para o mês de janeiro de 2023 (35%), indicando que o tratamento apesar de eficiente nos parâmetros físico-químicos e dos compostos emergentes, ainda precisa evoluir para reduzir o efeito tóxico em seu efluente final.

Ao longo deste estudo, pode-se concluir que a gestão operacional de um sistema é uma ação de rotina essencial e uma das mais desafiadoras nas áreas isoladas, devido ao difícil acesso à serviços e materiais. Com a manutenção periódica foram realizadas diversas melhorias: (1) instalação de nova caixa de gordura do EE e do CEADS, (2) troca da motobomba, (3) substituição do tanque pulmão, (4) instalação de novo temporizador da motobomba (5) replantio da Taboa no WC2, (6) instalação de uma nova mangueira porosa no sistema de aeração do FAS, (7) implementação de uma caixa de areia no final do sistema.

Desse modo, o EE ficou mais robusto, garantindo uma proteção aos equipamentos e um aumento no desempenho do tratamento gradativamente ao longo de cada etapa do estudo, além de servir como material de apoio para gestores aplicarem em suas realidades semelhantes.

Em relação as diferentes aplicações de reúso da água tratada, os resultados de coliformes termotolerantes de 3 campanhas do efluente final do EE foram validados com padrões e diretrizes para aplicação de reúso dos Estados da Bahia, Ceará, Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais, tendo em vista que ainda não há uma normativa com padrões para o Rio de Janeiro. Os tipos de reúso mais recomendados para o EE foram: reúso na irrigação, reúso urbano (exceto irrigação paisagística), ambiental, agrícola/florestal, agrossilvipastoril amplo e limitado, urbano amplo e limitado. Para resultados mais contundentes, recomenda-se que sejam feitas novas campanhas.

Por fim, como um dos produtos deste trabalho, foi desenvolvida a Cartilha do Ecossistema Engenheirado, um material de cunho educacional contendo ilustrações de cada etapa de tratamento, informações construtivas, de funcionamento, de manutenção, considerações gerais. Com isso, mais um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos terá suas tecnologias divulgadas, aumentando a possibilidade de replicação em diferentes regiões com características semelhantes, sendo uma ferramenta para universalização do saneamento e avanço da ODS-6.

6. RECOMENDAÇÕES

- Sabendo-se que as eficiências de remoção de nitrogênio foram afetadas durante todas as etapas de tratamento, pois o sistema de aeração não funcionou de maneira correta, devido às quedas de energia elétrica, recomenda-se a instalação de painéis fotovoltaicos para fornecer uma maior independência do sistema convencional de energia elétrica. Além disso, também se aconselha que seja instalado um aerador mais potente para garantir uma distribuição mais homogênea ao longo de toda a camada líquida do FAS;
- As unidades de tratamento do EE não foram projetadas para alcançar altas taxas de remoção de fósforo, como visto em outras estações, apresentando uma concentração final maior do que a permitida pela legislação vigente, dessa forma, recomenda-se que sejam estudadas tecnologias complementares para redução deste composto, quando for necessário;
- Outro possível aprofundamento dos estudos, diz respeito à modelagem e estimativa das taxas de fotossíntese e respiração diária no tanque de algas para cálculo de crescimento de biomassa e estimativa das taxas de remoção de nutrientes, além da melhoria na retenção das algas no tanque, a fim de evitar que as demais unidades de tratamento sofram com a presença desses organismos;
- Em relação às aplicações de reúso de água, recomenda-se que seja realizado um estudo mais aplicado com a qualidade do efluente final do EE com a abordagem da Avaliação Semiquantitativa de Risco Microbiológico para auxiliar nos ajustes necessários no EE (barreiras) para uma maior segurança na aplicação da água de reúso gerada e
- Fomentar palestras de educação ambiental e sanitária com os frequentadores e colaboradores do CEADS sobre boas práticas do uso das instalações hidrossanitárias, tratamento de esgotos domésticos e reúso de água para promover a conscientização sobre esses assuntos e indiretamente melhorar a eficiência do EE.

REFERÊNCIAS

- ABBEY, F. M. *Assessing existing water demand and supply patterns and reuse options as additional sources of water in the Greater Accra Metropolitan Area (GAMA)*. n. 10357606, p. 203, 2013.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12.209/2011. Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos domésticos*, 2011.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12.648/2018. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com algas (Chlophyceae)*, 2018.
- AL-JAYYOUSI, ODEH R. *Greywater reuse: towards sustainable water Management*. Desalination I56 18 1-1 92, 2003.
- ALMEIDA, R. A.; OLIVEIRA, L. F. C.; KLIEMANN, H. J. *Eficiência de espécies vegetais na purificação de esgoto sanitário*. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 37, n. 1. 1-9 p. 2007.
- AMARAL, A.F. *Monitoramento e avaliação da eficiência de um Reator piloto Bardenpho modificado-IFAS no tratamento de esgoto real: Remoção de Benzofenona e Dietilftalato*. Dissertação de Mestrado. UERJ. 102f. 2021.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - Brasília: ANA, 2021*.
- ANA - Agência Nacional de Águas. *Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. - Brasília: ANA, 2020*.
- ANA - Agência Nacional de Águas. *Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2017*.
- APHA; AWWA & WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23th. ed., 2017.
- ARAÚJO, B.M. *Avaliação da aplicabilidade da filtração terciária para condicionamento de efluente secundário a desinfecção por radiação ultravioleta*. Dissertação de Mestrado. UERJ. 118p. 2019.
- ARAÚJO, R. F.; ANDRADE NETO, C. O.; DELGADO, T. C.; SILVA, H. N.; MEDEIROS, I. B. A. *Uso de filtros aerados rudimentares para oxidação de nitrogênio amoniaco em efluentes de reatores anaeróbios*. XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Recife/PE. Anais ABES, II-452. 2009.

ARAÚJO S.D.S.; SALLES P.D.A.; SAITO C.H. *Modelos qualitativos, baseados na dinâmica do oxigênio dissolvido, para avaliação da qualidade das águas em bacias hidrográficas*. Desenvolvimento tecnológico e metodológico para medição entre usuários e comitês de bacia hidrográfica. Brasília: Departamento de Ecologia. Editora da UNB, 9-24, 2004.

AVILA C., MATAMOROS V., REYES-CONTRERAS C., PIÑA B., CASADO M., MITA L., et al. *Attenuation of emerging organic contaminants in a hybrid constructed wetland system under different hydraulic loading rates and their associated toxicological effects in wastewater*. Science of the Total Environment, 470, 1272–1280, 2014.

BAUMGARTEN B, JÄHRIG J, REEMTSMA T, JEKEL M. *Long term laboratory column experiments to simulate bank filtration: factors controlling removal of sulfamethoxazole*. Water Res 45:211–220. 2011.

BARSZCZ, L. B. et al. *Avaliação ecotoxicológica de efluentes tratados por alagados construídos*. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, n. 6, p. 1147–1156, 2019.

BERNAL, D.; RESTREPO, I.; GRUESO-CASQUETE, S. *Key criteria for considering decentralization in municipal wastewater management*. Heliyon, v. 7, n. 3, 2021.

BOAVIDA S. et al. *Centralized versus Decentralized Wastewater Systems – Potential of Water Reuse within a Transboundary Context*. New Water Policy and Practice – 2 v, Spring, 2016.

BRASIL. *Lei Federal Nº14.026, de 15 de julho de 2020*. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº9.984, de 2020. Brasília, 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. *Programa Nacional de Saneamento Rural*. Brasília: Funasa, 260p, 2019.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Básico. *Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB*. Brasília, 2013.

CALHEIROS, C. S. C.; RANGEL, A. O. S. S.; CASTRO, P. M. L. *Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater*. Water research, v. 41. 1790-1798 p. 2007.

CAPODAGLIO, A. G., CALLEGARI, A., CECCONET, D. & MOLOGNONI, D. *Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies*. Water Practice and Technology 12 (2), 463–477. doi:10.2166/wpt.2017.055, 2017.

CARDONA, J. A. et al. *Reuse-oriented decentralized wastewater and sewage sludge treatment for rural settlements in brazil: A cost–benefit analysis*. Desalination and Water Treatment, v. v. 91, p. 82–92, 2017.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluente líquido*. Organizadores: Brandão et al., 326 p. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

COLMENAREJO, M. F.; RUBIO, A.; SÁNCHEZ, E.; VICENTE, J.; GARCÍA, M. G.; BORJA, R. *Evaluation of municipal wastewater treatment plants with different technologies at Las Rozas, Madrid (Spain)*. *Journal of Environmental Management*, v. 81. 399-404 p. 2006.

COUTINHO, R. *Microextração líquido-líquido dispersiva na determinação de bisfenóis (A, S, F, AF) e de benzofenona em amostras aquosas reais e complexas: desenho experimental e otimização de processos*. Dissertação de Mestrado. UERJ. 95f. 2020.

COSTA, C.R.; OLIVI, P.; BOTTA, C.M.R.; ESPINDOLA, E.L.G. *A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação*. *Química Nova*, v. 31, n. 7, p. 1820-1830, 2008.

CUNHA, D. L.; PAULA M. L.; SILVA, S. M. C.; BILA, D. M.; FONSECA, E. M.; OLIVEIRA, J. L. *Ocorrência e remoção de estrogênios por processos de tratamento biológico de esgotos*. *Revista Ambiente e Água*, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2016.

DA-RIN, B.P. *Técnicas de Tratamento de esgotos*. Editora: Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária (ABES).v1. 2021.
ESTEVEZ, F. A. *Fundamentos de Limnologia*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602 p

FATTA-KASSINOS D., BESTER K., & KÜMMERER K. (EDS). *Xenobiotics in the urban water cycle: mass flows, environmental processes, mitigation and treatment strategies*. Vol. 16, 2010.

FERREIRA, Patrícia da Silva Figueiredo; MOTTA, Patrícia Constantino; SOUZA, Tayane Crispim de; SILVA, Thiago Paulo da; OLIVEIRA, Juliana Ferreira de; SANTOS, Ana Sílvia Pereira. *Avaliação preliminar dos efeitos da ineficiência dos serviços de saneamento na saúde pública brasileira*. *Revista Internacional de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, p. 214-229, jul/dez, 2016.

FREITAS, T.R. *Desempenho de tanques vegetados em um ecossistema engenheirado para tratamento descentralizado de esgotos domiciliares na Ilha Grande, RJ*. Dissertação de Mestrado. UERJ. 127p. 2011.

GANI, K.M.; KAZMI, A.A. *Ecotoxicological risk evaluation and regulatory compliance of endocrine disruptor phthalates in a sustainable wastewater treatment scheme*. *Environmental Science And Pollution Research*, [S.L.], v. 27, n. 8, p. 7785-7794, 2019.

HIRAKAWA, C.; PIVELI, R. P.; ALEM SOBRINHO, P. *Biofiltro aerado submerso aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator UASB: Estudo em escala piloto com esgoto sanitário*. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa/PB. Anais ABES, II-032. 1-14 p. 2002.

HONORATO, L.M.C., D'EÇA, N.F.G., SANTOS, A.S.P., SALOMÃO, A.L.S. *Tratamento descentralizado de esgoto doméstico: revisão sistemática*. Revista DAE, v. 69, n. 233, 2021.

HUSSAR, G. J.; BASTOS, M. C. *Tratamento de Efluente de Piscicultura com Macrófitas Aquáticas Flutuantes*. Engenharia Ambiental, V. 5, N. 3, P. 274-285, 2008.
SANTOS, S. L. DOS; HAANDEL, A. VAN. *Influência da temperatura sobre o desempenho do tratamento anaeróbio de esgoto*. Revista DAE, v. 67, n. 216, p. 52–69, 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

ILHA GRANDE – *Localização e dados*, 2020. Disponível em:
<<https://www.ilhagrande.com.br/ilha-grande/localizacao-e-dados/>>. Acesso em: 21 jan.2023.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 8ª edição. Rio de Janeiro: Fundo Editorial ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.

KACZALA, F.; ROQUE, O. C. C.; TONIATO, J. V.; NASCIMENTO, V. B. *Qualidade Microbiológica de Efluentes Domésticos e Viabilidade de Aplicação na Irrigação*. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande/MS. Anais ABES, II-350. 1-8 p. 2005.

KAETZL, K., LUBKEN, M., UZUN, G., GEHRING, T., NETTMANN, E., STENCHLY, K., WICHERN, M., *On-farm wastewater treatment using biochar from local agroresidues reduces pathogens from irrigation water for safer food production in developing countries*. Sci. Total Environ. 682, 601–610. 2019.

KASUN, T. *Natural Engineered Water Treatment: NEWT*. In: Water Innovations for Healthy, 2021, Anchorage, 2021.

KAVANAGH, L. J.; KELLER J. *Engineered ecosystem for sustainable on-site wastewater treatment*. Water research, v. 1. 823-831 p. 2007.

LAKHO, F. H. et al. *Decentralized grey and black water reuse by combining a vertical flow constructed wetland and membrane based potable water system: Full scale demonstration*. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, n. 1, p. 104688, 2021.

- LAVRNIĆ, S.; ZAPATER-PEREYRA, M.; MANCINI, M. L. *Water Scarcity and Wastewater Reuse Standards in Southern Europe: Focus on Agriculture*. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 228, n. 7, 2017.
- LIMA, M. A. DE M. et al. *Uso do Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas no desenvolvimento de trabalhos científicos*. *Revista Sustinere*, v. 8, n. 1, 2020.
- LIMA, M. A. DE M. et al. *Water reuse in Brazilian rice farming: Application of semiquantitative microbiological risk assessment*. *Water Cycle*, v. 3, n. March, p. 56–64, 2022.
- LIMA, M. A. DE M.; SANTOS, A. S. P.; VIEIRA, J. M. P. *Irrigação Com Água De Reúso No Brasil: Aplicação Do Modelo Semiquantitativo De Avaliação De Risco Microbiológico Para Saúde Humana*. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 04, n. 50 cm, p. 71–86, 2021.
- LIMA, M. R.; REISSMANN, C. B.; TAFFAREL, A. D. *Fitorremediação com macrófitas aquáticas flutuantes*. In: Andreoli, C. V.; Carneiro, C. (ed.) *Gestão integrada de mananciais eutrofizados*. Curitiba: Gráfica Capital Ltda., 2005.
- LINO F.; ISMAIL K. *Alternative treatments for the municipal solid waste and domestic sewage in Campinas, Brazil*. *Resources, Conservation and Recycling* 81, 24-30, 2013.
- LIU, W. et al. *Comparison between aerobic and anaerobic membrane bioreactors for trace organic contaminant removal in wastewater treatment*. *Environmental Technology & Innovation*, [S.L.], v. 17, p. 100564-100574, 2020.
- LUO Y., GUO W., NGO H. H., NGHIEM L. D., HAI F. I., ZHANG, J. et al. *A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment*. *Science of the Total Environment*, 473, 619–641, 2014.
- LUTTERBECK, C. A. et al. *Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas*. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, p. 527–536, 2017.
- MASSOUD, M. A., TARHINI, A. & NASR, J. A. *Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries*. *Journal of Environmental Management* 90 (1), 652–659. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.001, 2009.
- MEGERSA, G.; ABDULAH, J. *Irrigation system in Israel: A review*. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, v. 7, n. 3, p. 29-37, 2015.
- METCALF & EDDY. *Tratamento de Efluentes E Recuperação de Recursos (Wastewater Engineering – Treatment and Resource Recovery)*; Translation: Ivanildo Hespagnol, José Carlos Mierzwa, 5th ed. AMGH, Porto Alegre, 2016.
- MORAES, D. D. L. et al. *Análise Comparativa De Parâmetros Hidráulicos Para Dimensionamento De Tecnologias Em Estações De Tratamento De Esgoto*. *Revista Internacional de Ciências*, v. 10, n. 1, p. 22–41, 2020.

OKOLI, C. *Guia para realizar uma revisão sistemática da literatura*. Tradução de David Wesley Amado Duarte; Revisão técnica e introdução de João Mattar. eaD em Foco, 2019;9 (1): e748. DOI: <https://doi.org/10.18264/eadf.v9i1.748>, 2019.

OMS – Organização Mundial da Saúde. *Sanitation*. 2020. Disponível em: <<https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>> Acesso em: 21 de jan. 2023.

ONU – Organização das Nações Unidas. Department of Economics and Social Affairs. *Sustainable Development – the 17 Goals*. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals>> Acesso em: 21 de jan. 2023.

ORTIZ, M.; RALUY, R. G.; SERRA, L. *Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town*. *Desalination*, v. 204, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 121–131, 2007.

OTTER, P. et al. *Disinfection for decentralized wastewater reuse in rural areas through wetlands and solar driven onsite chlorination*. *Science of the Total Environment*, v. 721, p. 137595, 2020.

PAINEL SANEAMENTO BRASIL. *Saneamento + Saúde – Comparar por localidade – Brasil*, 2020. Disponível em: <<https://www.painelsaneamento.org.br/saneamento-mais?id=1&S%5Bid%5D=0>>. Acesso em: 21 jan. 2023.

RANJAN, R.; KUMAR, L.; SABUMON, P. C. *Process performance and reuse potential of a decentralized wastewater treatment system*. *Water Science and Technology*, v. 80, n. 11, p. 2079–2090, 2019.

RIO DE JANEIRO. *NOP-INEA-45 - Estabelece critérios e padrões de lançamento de esgoto sanitário*. RJ, 2021.

SALOMÃO, A.L.S. *Ecosistema engenheirado no tratamento descentralizado de águas residuárias de pequenos geradores: a engenharia ecológica na Ilha Grande, RJ*. Dissertação de Mestrado. UERJ. 166p. 2010.

SALOMÃO, A.L.S. et al. *Engineered ecosystem for on-site wastewater treatment in tropical areas*. *Water Science and Technology*, v.66, n.10, 2012.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. *Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica*. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007.

SANDERS, K. T. et al. *Clean energy and water: Assessment of Mexico for improved water services and renewable energy*. *Environment, Development and Sustainability*, v. 15, n. 5, p. 1303–1321, 2013.

SANTOS, A. S. P. et al. *Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reúso no Brasil*. Revista Sustinere, v. 8, n. 2, p. 437–462, 2020.

SOOKNAH, R. D.; WILKIE, A. C. *Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater*. Ecological Engineering, v. 22. 27-42 p. 2004.

SUBTIL, E. L., SANCHEZ, A. A. & CAVALHERO, A. *Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto e reúso de água*. Ciência e Tecnologia Ambiental: Conceitos e Perspectivas, 201–220. Editora UFABC, Santo André, Brasil, 2016.

SANTOS, A. S. P. et al. *Proposição De Uma Metodologia Estruturada De Avaliação Do Potencial Regional De Reúso De Água: 01 – Terminologia E Conceitos De Base*. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, p. 1–17, 2021.

SANTOS, A. S. P.; VIEIRA, J. M. P. *Reúso de água para o desenvolvimento sustentável: Aspectos de regulamentação no Brasil e em Portugal*. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, v. 8, n. 1, p. 50, 2020.

SHANTANU KUMAR PADHI, A. S. Q. AND A. Y. S. K. R. F. B. A. B. L. *Integrated Wastewater and Faecal Sludge Management for Ghana Integrated and Faecal Sludge 2019 Management*. Center for science and environment, p. 101–106, 2019.

SHARMIN, A. *Water and wastewater in Bangladesh, current status and design of a decentralized solution*. 72 p., Master Thesis, Water and Environmental Engineering Department of Chemical Engineering, Lund University, 2016.

SINGH, S. K.; CHAUDHARY, K.; JAIN, H. *Review on Sewerage Systems , Conditions & Awareness Measures Review on Sewerage Systems , Conditions & Awareness Measures*. v. 3, n. May, p. 319–322, 2018.

SONG, H.; NAKANO, K.; TANIGUCHI, T. et al. *Estrogen removal from treated municipal effluent in small-scale constructed wetland with different depth*. Bioresource Technology, v. 100, n. 12, p. 2945-2951, 2009.

SOKHELA, F. *Assessing the Potential Use of Struvite and Effluent from Decentralized Wastewater Treatment Systems (Dewats) as Plant Nutrient Sources for Early Maize (Zea Mays) Growth*. Master of Science in Agriculture (Crop Science) University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg. 2021.

TRAVIS, M. J.; WEISBROD, N.; GROSS, A. *Decentralized wetland-based treatment of oil-rich farm wastewater for reuse in an arid environment*. Ecological Engineering, v. 39, p. 81–89, 2012.

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. *World Water Assessment Programme (WWAP). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving no one Behind*. Paris, France, 2019.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. *Handbook for Managing Onsite and Clustered (Decentralized) Wastewater Treatment Systems*, EPA/832-B-05-001. Washington, DC, 66 pp, 2005.

UNICEF. *Every child lives in a safe and clean environment: Global Annual Results Report 2018*. p. 1–126, 2019.

VOLSCHAN JR., I. *Comentários sobre a NOP-INEA-45 (08/02/2021) que estabelece novos critérios e padrões de lançamento de esgotos sanitários no Estado do Rio de Janeiro*. DRHIMA – UFRJ, 2021. Disponível em: <https://www.drhima.poli.ufrj.br/index.php/br/destaque/noticias/320-comentarios-sobre-a-nop-inea-45-08-02-2021-que-estabelece-novos-criterios-e-padroes-de-lancamento-de-esgotos-sanitarios-no-estado-do-rio-de-janeiro>> Acesso em: 21 fev 2023.

VON SPERLING, M. & SALAZAR, B. L. *Determination of capital costs for conventional sewerage systems (collection, transportation and treatment) In a developing country*. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development* 3 (3), 365–374. doi:10.2166/washdev.2013.063, 2013.

VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. v.7. 2ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2014.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. v.1. 3ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2006.

ZIMMO, O.; PETTA, G. *Prospects of Efficient Wastewater Management and Water Reuse in Palestine*. Water Studies Institute – Birzeit University, n. May, 2005.

ZHU, S.; CHEN, H. *The fate and risk of selected pharmaceutical and personal care products in wastewater treatment plants and a pilot-scale multistage constructed wetland system*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 2, p. 1466–1479, 2014.

PRODUTIVIDADE ACADÊMICA

Artigos completos

1) *Submetido*

Capítulos de livros

2) **JACOB, R. V. B.**; SOUZA, M. C. V. P.; ROCHA, D. L. P.; SALOMAO, A. L. S. *Saneamento em Comunidades Isoladas - Tratamento Descentralizado de Esgoto Doméstico na Ilha Grande/RJ*. In: Desenvolvimento sustentável [livro eletrônico]: desdobramentos ambientais, sociais e econômicos sobre a exploração do meio ambiente: volume 1 /. 1ed. Rio de Janeiro: e-Publicar, v. 01, p. 01-357, 2022.

Trabalhos completos publicados em congressos nacionais

3) **JACOB, R. V. B.**; SOUZA, M. C. V. P.; HONORATO, L.; SALOMAO, A. L. S.; PEREIRA, A. S. *Avaliação do desempenho de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos - Ecossistema Engenheirado - considerando a relação entre a produção de biomassa e a remoção de carga orgânica e nutrientes*. In: 32º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2023, Belo Horizonte. 32º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2023 (Submetido).

4) **JACOB, R. V. B.**; SOUZA, M. C. V. P.; SALOMAO, A. L. S.; PEREIRA, A. S.; MARQUES, M. *Sistema Descentralizado para tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas da Ilha Grande/RJ*. In: 31º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2021, Curitiba. 31º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2021.

Resumos expandidos publicados em congressos nacionais

5) **JACOB, R. V. B.**; SOUZA, M. C. V. P.; LISBOA, V. S.; PEREIRA, A. S.; SALOMAO, A. L. S. *Diagnóstico e Proposição de Tecnologias para o Tratamento de Esgotos Domésticos na Baía da Ilha Grande - RJ - Brasil*. In: XX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2022, Aveiro (Portugal). Resumos, 2022.

6) SOUZA, M. C. V. P.; **JACOB, R. V. B.**; SOUZA, H. O.; PEREIRA, A. S.; SALOMAO, A. L. S. *Saneamento Básico e Escolas: Uma Contribuição para a Educação Ambiental de Abraão-Ilha Grande-RJ, Brasil*. In: XX SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2022, Aveiro (Portugal). Resumos, 2022.

Resumos publicados em congressos internacionais

7) **JACOB, R. V. B.**; SOUZA, M. C. V. P.; PEREIRA, A. S.; MARQUES, M.; SALOMAO, A. L. S. *Engineered Ecosystem: Biotechnology In Decentralized Wastewater Treatment For Isolated Areas*. In: Linnaeus ECO-TECH 2022, 2022, Kalmar, Sweden. Linnaeus ECO-TECH 2022, 2022.