UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REDE NACIONALEM
GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS
MESTRADO PROFISSIONAL EM
GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Fagner Brito Praxedes

Reúso de água cinza tratada por sistema em escala domiciliar: aplicação em quintais produtivos no semiárido potiguar

PAU DOS FERROS
2026

Fagner Brito Praxedes

Reúso de água cinza tratada por sistema em escala domiciliar: aplicação em quintais produtivos no semiárido potiguar

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Linha de Pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água

Orientador: Jacineumo Falcão de Oliveira ,Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira
responsabilidadedo(a)autor(a),sendoomesmo,passíveldesançõesadministrativasoupenais,casosejaminfringidasa sleis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectivaata.Amesmapoderáservirdebaseliterápriaparanovaspesquisas,desdequeaobraeseu(a)respectivo(a)autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P919rPraxedes, Fagner Brito.
Reúso de água cinza tratada por sistema em escala domiciliar: aplicação em quintais produtivosno semiárido potiguar/Fagner Brito Praxedes. - 2026.

93 f. : il.

Orientador: Jacineumo Falcão de Oliveira.
Dissertação(Mestrado)-UniversidadeFederal Rural do Semi-árido, ProgramadePós-graduaçãoem Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, 2026.

1. tratamento de efluentes. 2. segurança hídrica. 3. tecnologias sociais. 4. sustentabilidadeagrícola.I.Oliveira,Jacineumo Falcão de , orient. II. Título.

Fichacatalográficaelaboradaporsistemageradorautomáticoemconformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros Bibliotecária:ErlandaMariaLopesdaSilva CRB: 15/966

OserviçodeGeraçãoAutomáticadeFichaCatalográficaparaTrabalhosdeConclusãodeCurso(TCC´s)foidesenvolvidopeloInstitutode Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de BibliotecasdaUniversidadeFederalRuraldoSemi-Árido(SISBI-UFERSA),sendocustomizadopelaSuperintendênciadeTecnologiadaInformaçãoe Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos deGraduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Fagner Brito Praxedes

Reúso de água cinza tratada por sistema em escala domiciliar: aplicação em quintais produtivos no semiárido potiguar

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Linha de Pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água

Orientador: Jacineumo Falcão de Oliveira, Prof. Dr.

Defendida em: 28 / 07 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

_____

Jacineumo Falcão de Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente e Orientador

_____

Solange Aparecida Goularte Dombroski, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador Interno

_____

Fernando Neris Rodrigues, Prof. Dr. (UEMG)
Membro Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às agricultoras e aos agricultores familiares do semiárido, que, com coragem, sabedoria e perseverança, transformam os desafios da escassez hídrica em oportunidades de produção e esperança.

Que esta pesquisa represente uma pequena contribuição para o fortalecimento da agricultura familiar e para a valorização de tecnologias de reúso de água que promovam a convivência sustentável com o semiárido.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida, por me abençoar com saúde e paz.

À minha família, pelo amor incondicional e compreensão e apoio em todos os momentos.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Pau dos Ferros-RN, pela oportunidade de realizar este mestrado, que contribuiu significativamente para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu orientador, Prof. Jacineumo Falcão de Oliveira, pela confiança, paciência e valiosas orientações ao longo de toda a pesquisa.

Ao Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Norte (EMATER-RN), pela oportunidade de conciliar minha atuação profissional com a qualificação acadêmica.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão de Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), campus Pau dos Ferros, pelos conhecimentos compartilhados.

Aos colegas de mestrado e a todos (as) que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, meu sincero agradecimento.

Por fim, expresso minha gratidão às agricultoras e aos agricultores familiares que inspiram este trabalho e que, diariamente, demonstram que é possível produzir, inovar e conviver de forma sustentável com o Semiárido.

RESUMO

A escassez hídrica constitui um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro, tornando necessária a adoção de alternativas que promovam a segurança hídrica e alimentar das populações rurais. Nesse contexto, o reúso de águas cinzas provenientes de atividades domésticas destaca-se como uma estratégia de convivência com a seca, contribuindo para a redução da demanda sobre os mananciais naturais, a preservação dos recursos hídricos e o fortalecimento da agricultura familiar. Assim, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de um sistema modular de tratamento de águas cinzas, bem como seus efeitos sobre a qualidade do solo em quintais produtivos de agricultores familiares. O estudo foi desenvolvido na comunidade Conceição, município de Encanto, Rio Grande do Norte, inserida na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, analisando o desempenho de sistema de tratamento e reúso de águas cinzas em cinco quintais produtivos durante os períodos chuvoso e seco de 2025. O sistema de tratamento era composto por caixa de gordura, reator decanto-digestor, filtro biológico, tanque de irrigação e sistema de bombeamento para irrigação por gotejamento. Foram realizadas análises físico-químicas da água cinza na entrada e saída do sistema, incluindo pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, dureza, Razão de Adsorção de Sódio (RAS) e concentrações de íons, além da caracterização química do solo irrigado. Os resultados demonstraram que o sistema apresentou eficiência na melhoria da qualidade do efluente, promovendo a neutralização do pH e redução média de 57,8% dos sólidos totais dissolvidos. A água tratada apresentou potencial para reúso na irrigação agrícola, incluindo o cultivo de frutíferas e plantas medicinais, com predominância de limão, acerola, goiaba, banana, manga e coco. Entretanto, foi observada uma restrição moderada relacionada à salinidade, especialmente durante o período seco. No solo, verificou-se influência significativa da sazonalidade, com aumento dos teores de fósforo, sódio, percentual de sódio trocável e condutividade elétrica durante o período não chuvoso, enquanto os maiores valores de soma de bases e capacidade de troca catiônica ocorreram no período chuvoso. Apesar do incremento da salinidade e da sodicidade, os valores permaneceram abaixo dos limites críticos para caracterização de solos salinos ou sódicos. Os quintais produtivos sustentaram uma diversidade de até 14 espécies vegetais destinadas ao autoconsumo, doação e comercialização. Conclui-se que o tratamento e o reúso de águas cinzas constituem uma tecnologia social de baixo custo, tecnicamente viável para a convivência com a escassez hídrica no Semiárido. Sua adoção promove a segurança hídrica, fortalece a agricultura familiar e contribui para a produção sustentável de alimentos, favorecendo a sustentabilidade dos sistemas produtivos familiares. Entretanto, o monitoramento contínuo da qualidade da água e do solo, aliado à adoção de práticas adequadas de manejo, é fundamental para prevenir processos de salinização e sodificação em longo prazo.

Palavras-chave: tratamento de efluentes; segurança hídrica; tecnologias sociais; sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

Water scarcity is one of the main challenges to sustainable development in the Brazilian semiarid region, making it necessary to adopt alternatives that promote water and food security among rural populations. In this context, the reuse of greywater generated from domestic activities stands out as a strategy for coping with drought, contributing to reducing demand on natural water sources, preserving water resources, and strengthening family farming. Thus, this study aimed to evaluate the performance of a modular greywater treatment system, as well as its effects on soil quality in productive home gardens managed by family farmers. The study was conducted in the Conceição community, in the municipality of Encanto, Rio Grande do Norte, located within the Apodi-Mossoró River basin, analyzing the performance of a graywater treatment and reuse system in five productive home gardens during the 2025 rainy and dry seasons.. The treatment system consisted of a grease trap, settling-digester reactor, biological filter, irrigation tank, and pumping system for drip irrigation. Physicochemical analyses of greywater were performed at the inlet and outlet of the system, including pH, electrical conductivity, total dissolved solids, hardness, Sodium Adsorption Ratio (SAR), and ion concentrations, in addition to the chemical characterization of the irrigated soil. The results demonstrated that the system was effective in improving effluent quality, promoting pH neutralization and an average reduction of 57.8% in total dissolved solids. The treated water showed potential for reuse in agricultural irrigation, including the cultivation of fruit trees and medicinal plants, with lemon, acerola, guava, banana, mango, and coconut being the predominant species. However, a moderate salinity restriction was observed, particularly during the dry period. In the soil, a significant influence of seasonality was observed, with increased levels of phosphorus, sodium, exchangeable sodium percentage, and electrical conductivity during the dry period, whereas the highest values of sum of bases and cation exchange capacity occurred during the rainy period. Despite the increase in salinity and sodicity, the values remained below the critical thresholds for the classification of soils as saline or sodic. The productive home gardens supported a diversity of up to 14 plant species intended for household consumption, donation, and sale. It is concluded that the treatment and reuse of greywater constitute a low-cost social technology that is technically feasible for coping with water scarcity in the Brazilian Semiarid. Its adoption promotes water security, strengthens family farming, and contributes to sustainable food production, thereby enhancing the sustainability of family-based production systems. However, continuous monitoring of water and soil quality, combined with the adoption of appropriate management practices, is essential to prevent salinization and sodification processes in the long term.

Keywords: wastewater treatment; water security; social technologies; agricultural sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Sistema de Saneamento Rural e Reúso de Águas Cinzas da SEAPAC **38**
Figura 2 -Localização dos pontos de coleta de águas cinzas – Comunidade da Conceição Zona Rural do Encanto/RN **49**
Figura 3 - Precipitação acumulada no ano de 2025 na cidade do Encanto/RN **51**
Figura 4 - Sistema de tratamento de águas cinzas **53**

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais parâmetros e critérios recomendados para o reúso seguro de águas cinzas 26
Quadro 2 - Tipos de sistemas de tratamento de águas cinzas, definição e exemplos 35
Quadro 3 - Culturas cultivadas em cada quintal produtivo 58
Quadro 4 - Comparativo Geral 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de águas cinzas mistas e correlação com a COEMA 02/2017 ..... **21**
Tabela 2 - Elementos prevalentes em águas cinzas mistas **23**
Tabela 3 - Composição microbiana de águas cinzas mistas disponibilizadas na literatura **24**
Tabela 4 - Parâmetros de qualidade de água para usos restritivos não potáveis **29**
Tabela 5 - Padrões de lançamento **30**
Tabela 6 - Padrões de água para reúso agrícola conforme a COEMA/CE (2017) **33**
Tabela 7 - Localização dos quintais e sistemas de reúso **50**
Tabela 8 - Caracterização dos quintais produtivos **59**
Tabela 9 - Resultados das análises de água nos período chuvoso e seco. **63**
Tabela 10 - Resultado de análise dos parâmetros químicos de águas - Período chuvoso **64**
Tabela 11 - Resultado de análise dos parâmetros químicos de águas - Período não chuvoso **64**
Tabela 12 - Resultado de análise de águas complementar- Período não chuvoso **70**
Tabela 13 - Comparativo das análises de solo: Período chuvoso e não chuvoso **74**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APHA	American Public Health Association
ASA	Articulação Semiárido Brasileiro
CE	Condutividade Elétrica
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COEMA/CE	Conselho Estadual do Meio Ambiente do Ceará
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos (Bahia)
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Electrical Conductivity (Condutividade Elétrica, termo em inglês)
EMATER-RN	Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Norte
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Environmental Protection Agency (Estados Unidos)
FAO	Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDEMA	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte
IFRN	Instituto Federal do Rio Grande do Norte
IGARN	Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte
NBR	Norma Brasileira Registrada
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
O&G	Óleos e Graxas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PST	Percentual de Sódio Trocável
RAS	Razão de Adsorção de Sódio
SAR	Sodium Adsorption Ratio (Razão de Adsorção de Sódio, termo em inglês)
SB	Soma de Bases
SS	Sólidos Sedimentáveis
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
SEAPAC	Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários
SEMARH	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
V%	Saturação por Bases
WHO	World Health Organization/ Organização Mundial da Saúde

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
B	Boro
Ca/Ca^{2+}	Cálcio
Cl/Cl^{-}	Cloro ou Cloreto
cm	Centímetro
cmolc dm^{-1}	Centimol de carga por decímetro cúbico
Cu	Cobre
dSm^{-1}	DeciSiemens por metro
Fe	Ferro
g	Grama
g dm^{-3}	Grama por decímetro cúbico
g kg^{-1}	Grama por quilograma
K^{+}	Potássio
L	Litro
m	Metro
m^2	Metro quadrado
Mg^{2+}	Magnésio
mg L^{-1}	Miligrama por litro
mg dm^{-3}	Miligramas por decímetro cúbico
mm	Milímetro
mmolc/L	Milimol de carga por litro
Na^{+}	Sódio
NMP.100 mL^{-1}	Número mais Provável por 100 mililitros
P	Fósforo
S	Enxofre
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
Zn	Zinco
ºC	Grauscelsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 OBJETIVOS 15
2.1 Objetivo Geral 15
2.2 Objetivos Específicos 15
3 REFERENCIAL TEÓRICO 16
3.1 Água e a importância do reúso para o semiárido 16
3.2 Águas cinzas 17
3.3 Características físicas, químicas e microbiológicas das águas cinzas 19
3.4 Riscos sanitários e agronômicos associados ao reúso de águas cinzas 24
3.5 Arcabouço normativo internacional e nacional para reuso agrícola de águas cinzas 25
3.5.1 Arcabouço normativo internacional 25
3.5.2 Arcabouço normativo brasileiro 28
3.5.3 Regulamentações Estaduais 31
3.6 Sistemas de Tratamento de Águas Cinzas 34
3.6.1 Panorama Geral das Tecnologias de Tratamento 35
3.6.2 Caixa de gordura 39
3.6.3 Decanto-digestor 39
3.6.4 Filtro biológico aeróbio descendente 40
3.6.5 Tanque de armazenamento 41
3.6.6 Sistema de Irrigação por Gotejamento 41
3.7 Qualidade de água, dinâmica do solo e monitoramento no reúso 42
3.8 Desafios, Oportunidades e Políticas Públicas para o reúso 43
4 MATERIAIS E MÉTODO 49
4.1 Área de estudo 49
4.2 Características edafoclimáticas da área de estudo 50
4.3 Disponibilidade hídrica nas comunidades 52
4.4 Sistema de tratamento e reúso 52
4.5 Monitoramento do sistema de tratamento e reúso 55
4.6 Coleta e análise do solo 56
5 RESULTADOS 58
5.1 Caracterização dos quintais 58

5.1.1 Diversidade de cultivos 58
5.1.2 Desempenho hidráulico dos sistemas de irrigação 59
5.1.3 Destinação da produção da agricultura familiar 61
5.2 Desempenho do sistema de tratamento entre o período chuvoso e não chuvoso 62
5.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE) 65
5.2.2 Sódio (Na^+) e Relação de Adsorção de Sódio (RAS) 67
5.2.3 Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Dureza total 68
5.2.4 Cloretos (Cl^-) 68
5.2.5 STD, SS e alcalinidade 69
5.2.6 Enquadramento do efluente e atendimento à Resolução COEMA nº 02/2017 72
5.3 Qualidade do solo em quintais produtivos com sistemas de reúso de águas cinzas 73
5.3.1 Potencial hidrogeniônico (pH) 74
5.3.2 Condutividade elétrica (CE) 75
5.3.3 Fósforo (P) 76
5.3.4 Potássio (K^+) e Sódio (Na^+) 76
5.3.5 Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Soma de Bases (SB) 77
5.3.6 Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação por Bases (V%) e Percentual de Sódio trocável 78
5.4 Estratégia de manejo seguro e eficiente para o reúso dessas águas em sistemas produtivos da agricultura familiar 80
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 82
REFERÊNCIAS 84
APÊNDICE A: QUINTAL PRODUTIVO: REUTILIZANDO ÁGUA E PRODUZINDO VIDA NO SEMIÁRIDO - UMA HISTÓRIA SOBRE ÁGUA, SOLO E AGRICULTURA SUSTENTÁVEL 94

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica constitui um dos principais desafios ambientais e socioeconômicos enfrentados pelas populações que habitam o semiárido brasileiro. Caracterizada pela irregularidade pluviométrica, pelas longas estiagens e pelas elevadas taxas de evapotranspiração potencial, essa região apresenta limitações naturais que comprometem o abastecimento humano, a produção agrícola e a sustentabilidade dos ecossistemas locais (Andrade *et al*., 2018). Nesse contexto, a convivência com o semiárido exige o desenvolvimento e a adoção de práticas inovadoras de gestão dos recursos hídricos que conciliem eficiência no uso da água, conservação ambiental e inclusão social, especialmente diante do agravamento das mudanças climáticas e da crescente pressão sobre os recursos naturais (ANA, 2021).

Essa realidade se manifesta com particular intensidade no semiárido do Alto Oeste Potiguar, região historicamente marcada pela redução da disponibilidade hídrica e pelo avanço da degradação ambiental. A escassez de água doce, associada à degradação ambiental e à variabilidade climática, amplia a necessidade de práticas sustentáveis de convivência com o semiárido, entre elas o reúso de águas residuais domésticas (ANA, 2021; Lima; Medeiros, 2022). É nesse cenário regional que se insere a bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, área de referência para o presente estudo.

Entre as alternativas para o uso racional da água, o reúso de águas cinzas se destaca como uma estratégia promissora e eficiente para o manejo hídrico em escala doméstica e comunitária. Segundo Eriksson *et al.* (2002), as águas cinzas correspondem às águas residuárias domésticas provenientes de atividades como banho, lavagem de roupas, uso de pias e cozinhas, excluindo-se, de modo geral, os efluentes provenientes de vasos sanitários. Quando submetidas a processos adequados de tratamento, essas águas podem ser reutilizadas em atividades que não exigem padrão de potabilidade, substituindo parcialmente o uso de água potável e ampliando a disponibilidade hídrica para a produção de alimentos.

Nesse sentido, o reúso de águas cinzas constitui uma alternativa para a gestão sustentável dos recursos hídricos e pode contribuir para a convivência com períodos prolongados de seca, especialmente em regiões semiáridas (FAO, 2010; Ventura; Garcia; Andrade, 2019). No entanto, a utilização dessas águas sem controle de qualidade e critérios de manejo na aplicação pode acarretar riscos ambientais e sanitários, associados à presença de elementos potencialmente tóxicos, dependendo da origem dos efluentes domésticos, como

surfactantes, sais dissolvidos, nutrientes e microrganismos patogênicos, comprometendo a qualidade do solo e a saúde das populações (Lameira *et al*., 2020).

A agricultura familiar, responsável por importante parcela da segurança alimentar e da geração de renda no semiárido nordestino, frequentemente recorre ao reúso de águas cinzas como estratégia de adaptação à escassez hídrica, ainda que a ausência de acompanhamento técnico e de orientações adequadas favoreça o manejo inadequado desses efluentes, com impactos negativos sobre o solo, a água e a vegetação (Silva; Oliveira; Medeiros, 2019).

Apesar da relevância dessa prática, ainda é escassa a literatura que acompanhe, de forma pareada e sazonal, os efeitos do reúso de águas cinzas sobre os parâmetros físico-químicos do solo em quintais produtivos reais, o que limita a formulação de diretrizes técnicas seguras para a agricultura familiar do semiárido (Almeida; Silva; Moreira, 2024). Assim, compreender como essas águas interferem nos atributos físicos e químicos do solo é fundamental para prevenir processos de salinização, contaminação e perda da fertilidade, assegurando a viabilidade ambiental e produtiva do reúso agrícola (Medeiros *et al*., 2021).

O uso de tecnologias sustentáveis voltadas ao reúso de águas cinzas em ambientes críticos do semiárido brasileiro também se alinha às premissas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), cuja Meta 6.4 propõe aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores, assegurando a sustentabilidade da oferta hídrica e reduzindo os impactos da escassez (ONU, 2015).

Portanto, a relevância deste estudo manifesta-se em diferentes dimensões. No âmbito ambiental, a adoção de sistemas descentralizados de tratamento de águas cinzas pode favorecer o uso racional dos recursos hídricos, a conservação do solo e a redução do desperdício de água, ao possibilitar o tratamento e o aproveitamento do efluente próximo ao local de geração. No aspecto social, essa alternativa pode contribuir para o fortalecimento da segurança alimentar e da autonomia hídrica de famílias agricultoras, por meio da disseminação de práticas de baixo custo e potencialmente replicáveis. Sob a perspectiva política e normativa, os resultados podem subsidiar o aprimoramento de políticas públicas e diretrizes técnicas voltadas ao uso seguro e eficiente de águas de reúso na agricultura familiar, considerando as diretrizes nacionais estabelecidas para o reúso direto não potável com finalidade agrícola (Brasil, 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar, nos períodos chuvoso e seco, o desempenho de um sistema modular de tratamento de águas cinzas, seus efeitos sobre a qualidade do solo e seu potencial de reúso em quintais produtivos de agricultores familiares do Alto Oeste Potiguar.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os parâmetros físicos e químicos das águas cinzas afluentes e efluentes do sistema de tratamento;
- Avaliar a eficiência do sistema de tratamento na melhoria da qualidade da água cinza para fins de reúso agrícola, considerando os parâmetros físico-químicos e as concentrações de íons nos períodos chuvoso e seco;
- Mapear as espécies vegetais cultivadas nos quintais produtivos irrigados com águas cinzas tratadas;
- Determinar as alterações nos parâmetros físicos e químicos do solo decorrentes da aplicação contínua das águas cinzas tratadas;
- Discutir os potenciais riscos ambientais e sanitários associados ao reúso das águas cinzas tratadas, com base nos resultados obtidos e nos parâmetros de qualidade aplicáveis ao reúso agrícola;
- Propor uma estratégia de manejo seguro e eficiente para o reúso de águas cinzas tratadas em sistemas produtivos da agricultura familiar.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Água e a importância do reúso para o semiárido

A disponibilidade de água doce no mundo constitui um dos maiores desafios sociais, ambientais e econômicos da atualidade. Embora o Brasil detenha uma das maiores reservas hídricas do planeta, ainda enfrenta sérios problemas relacionados à gestão, à qualidade, à quantidade e à distribuição dos recursos hídricos, o que compromete o acesso à água potável em diversas regiões do país (ANA, 2020; UNESCO, 2024). Essa realidade torna-se ainda mais crítica no semiárido brasileiro, onde a escassez hídrica representa um obstáculo histórico ao desenvolvimento social e produtivo.

A escassez de água configura uma das principais limitações ao desenvolvimento sustentável no semiárido, tornando indispensável o uso racional e o reaproveitamento dos recursos hídricos disponíveis (Silva, 2021). A irregularidade das chuvas, elevadas taxas de evapotranspiração potencial, o rápido escoamento superficial e a baixa disponibilidade de reservatórios naturais perenes intensificam a vulnerabilidade hídrica da região. Nesse contexto, torna-se fundamental a implementação de alternativas que promovam maior segurança hídrica para as populações e para as atividades produtivas locais (Dias *et al*., 2025).

A região semiárida demanda tecnologias que potencializem o uso dos recursos hídricos, contribuindo para a segurança alimentar e ambiental das comunidades. As tecnologias sociais, caracterizadas por métodos simples, de baixo custo e reduzido consumo de energia, voltados às populações rurais difusas, destacam-se como alternativas sustentáveis (Dias *et al*., 2025). Entre essas tecnologias, o reúso de águas cinzas apresenta-se como uma estratégia eficiente, viável e sustentável, aliando o manejo adequado dos recursos hídricos à mobilização social e reafirmando a importância do acesso à terra e da gestão da água para a garantia da segurança alimentar das famílias rurais do semiárido. Além disso, sua aplicação em usos não potáveis, como irrigação agrícola, limpeza urbana e atividades industriais, amplia a disponibilidade hídrica e reduz a pressão sobre as fontes de água potável (Costa *et al*., 2022; Santana et al., 2024).

O reúso de efluentes tratados contribui diretamente para a redução da demanda sobre os mananciais naturais e para o aumento da resiliência das comunidades inseridas em regiões semiáridas (Marangon *et al*., 2020; Silva *et al*., 2021). Além disso, essa prática auxilia na diminuição da poluição hídrica, ao evitar o lançamento inadequado de efluentes em corpos

d’água, promovendo uma gestão mais integrada e sustentável dos recursos hídricos (von Sperling, 2014; WHO, 2006).

Entretanto, para que o reúso ocorra de forma segura e eficiente, é indispensável garantir a qualidade da água tratada, considerando parâmetros técnicos, ambientais e sanitários aplicáveis. Esse cenário normativo também vem sendo fortalecido por iniciativas recentes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que promoveu consulta pública para a elaboração de uma Norma de Referência sobre diretrizes para o reúso não potável de água proveniente de efluentes da prestação de serviços públicos de esgotamento sanitário (ANA, 2026), associadas a regulações regionais, como a Resolução COEMA nº 02/2017, no Estado do Ceará. A adoção de sistemas adequados de tratamento, associada ao monitoramento contínuo da qualidade da água, é essencial para reduzir potenciais riscos à saúde humana, ao meio ambiente e à qualidade do solo (Brasil, 2011).

Dessa forma, o reúso de efluentes, quando realizado de maneira planejada e fundamentado em critérios técnicos e legais, representa uma alternativa estratégica para o suprimento hídrico em períodos de estiagem no semiárido, promovendo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também o fortalecimento do desenvolvimento socioeconômico regional. Silva *et al*. (2023) apontam uma tendência observada entre a redução do consumo de água potável e o aumento do uso de águas cinzas, reforçando a necessidade de destinar a água de melhor qualidade para fins mais nobres, como o consumo humano.

Nesse sentido, estudos como o de Bezerra *et al*. (2019) demonstram que a fertirrigação suplementar com águas cinzas em quintais produtivos da agricultura familiar apresenta resultados satisfatórios, mostrando-se adequada para irrigação e sem causar impactos negativos significativos nas características químicas do solo.

3.2 Águas cinzas

As águas cinzas correspondem à parcela das águas residuárias domésticas geradas em atividades como banho, higiene pessoal, lavagem de roupas e limpeza doméstica, excluindo os efluentes provenientes dos vasos sanitários. Essa fração representa aproximadamente 75% do volume total de esgoto residencial (Eriksson *et al*., 2002).Por apresentarem elevado volume de geração e baixa concentração de carga poluidora em comparação às águas negras, as águas cinzas possuem alto potencial para reúso em diferentes aplicações, constituindo-se como uma alternativa sustentável para a conservação dos recursos hídricos (Oteng-Peprah*et al*., 2018).

A composição das águas cinzas é variável e depende de fatores como hábitos de consumo, atividades domésticas realizadas, produtos utilizados, equipamentos empregados e condições climáticas (Katukiza*et al*., 2014; Nizeyimana*et al*., 2023). Em comparação ao esgoto doméstico convencional, essas águas geralmente apresentam menores concentrações de matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, em razão da ausência dos efluentes sanitários provenientes de vasos sanitários (Eriksson *et al*., 2002). Entretanto, sua composição pode apresentar concentrações relevantes de sais, sódio e surfactantes, especialmente em função dos produtos de limpeza utilizados nas atividades domésticas, constituindo aspectos importantes para a avaliação de sua adequação ao reúso agrícola.

Nesse sentido, Bazzarella (2005) apresenta que a inclusão dos efluentes provenientes de cozinhas pode elevar a carga orgânica do sistema devido à presença de óleos, gorduras e resíduos alimentares, aumentando a complexidade do tratamento. Dessa forma, a definição e a caracterização das águas cinzas podem variar de acordo com as fontes consideradas, os objetivos do reúso e as características do sistema de tratamento empregado.

Destaca-se que essas águas representam uma parcela significativa dos efluentes domésticos, correspondendo, em média, de 30 a 50% da carga orgânica e de 9 a 20% da carga de nutrientes presentes nas águas residuárias residenciais (Friedler*et al*., 1996, p. 65; Boano*et al*., 2020, p. 711).

Por apresentarem composição heterogênea, as águas cinzas sofrem influência de diversos fatores externos, como o volume de água consumida, os produtos de limpeza e higiene pessoal utilizados, o perfil socioeconômico dos moradores, a faixa etária dos residentes, os hábitos domésticos, o local de coleta e as características da área onde a residência está inserida, seja urbana, rural ou litorânea (Rampelotto*et al*., 2014). Esses fatores interferem diretamente na qualidade física, química e microbiológica desse efluente, tornando necessária uma análise específica para cada realidade.

A produção média de águas cinzas varia entre 60 e 200 litros per capita por dia em países desenvolvidos, o que demonstra seu elevado potencial de reaproveitamento e pode representar uma economia de água potável entre 50 e 80% (Noutsopoulos*et al.*, p. 337, 2018). Assim, com um menor grau de contaminação fecal, aliado ao volume expressivo gerado diariamente, as águas cinzas tornam-se um efluente atrativo para o reúso (Eriksson *et al*., 2002). Ademais, sua disponibilidade acompanha diretamente as atividades cotidianas da população, configurando-se como uma alternativa sustentável para o fornecimento de água destinada a usos não potáveis, desde que exista uma capacidade mínima de armazenamento e controle (Morel; Diener, 2006).

Embora apresentem qualidade superior às águas negras, as águas cinzas ainda possuem características físicas, químicas e microbiológicas que exigem atenção quanto ao seu tratamento e destinação. Estudos realizados em zonas rurais do semiárido brasileiro identificaram a presença significativa de matéria orgânica, expressa em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), com valores próximos de 117 mg L^{-1}, associados principalmente à presença de sabões, detergentes, óleos, gorduras e produtos de higiene e limpeza (Silva *et al*., 2020).

Begosso (2009) também destaca que elevadas concentrações de nitrogênio (N) e fósforo (P) estão frequentemente relacionadas ao uso de detergentes fosfatados, sabões e resíduos alimentares, especialmente nas águas cinzas provenientes das cozinhas.

Além das características físico-químicas, as águas cinzas podem apresentar riscos microbiológicos devido à presença de microrganismos patogênicos, como bactérias, vírus e protozoários, introduzidos no sistema por atividades cotidianas, como a lavagem das mãos, o banho de crianças e a manipulação de alimentos crus (Eriksson *et al*., 2002). Outrossim, torna-se fundamental caracterizar os diferentes tipos de águas cinzas e adotar métodos de tratamento compatíveis com sua composição e com os usos pretendidos, garantindo a segurança sanitária e a eficiência do reúso.

Dessa forma, conhecer a origem e os fatores que influenciam a composição das águas cinzas é fundamental para definir estratégias adequadas de controle, tratamento e reúso, especialmente em aplicações como irrigação agrícola, jardinagem e limpeza de áreas externas. As características desse efluente variam não apenas em função da sua origem doméstica, mas também de fatores climáticos, socioculturais e da qualidade da água de abastecimento utilizada pela população (Gross *et al*., 2015), o que reforça a necessidade de adaptação das tecnologias de tratamento às condições locais.

3.3 Características físicas, químicas e microbiológicas das águas cinzas

As águas cinzas são compostas por diferentes fluxos domésticos provenientes de atividades cotidianas, como banho, lavatórios, lavanderia e cozinha, sendo que cada uma dessas fontes apresenta características físico-químicas e microbiológicas específicas. Águas provenientes de chuveiros e lavatórios, por exemplo, tendem a apresentar menor carga orgânica e microbiológica, enquanto aquelas oriundas das cozinhas geralmente possuem maiores níveis de contaminação devido à presença de óleos, gorduras e resíduos alimentares (Eriksson *et al*., 2002).

A fração gerada na lavanderia também merece destaque, pois pode conter elevadas concentrações de detergentes, alvejantes, surfactantes e sais, influenciando parâmetros como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e turbidez (Morel; Diener, 2006). Nesse sentido, Friedler*et al*. (2004) observaram que os poluentes presentes nas águas cinzas combinadas se distribuem de forma desigual entre os diferentes usos domésticos. Segundo os autores, as águas provenientes das pias de cozinha apresentaram maiores concentrações de DQO (42%) e sólidos suspensos voláteis (58%), enquanto os efluentes de máquinas de lavar roupas concentraram 22% da DQO, 37% de fosfato (PO_4^{3-}) e 40% de sódio (Na^+), mesmo representando apenas de 13 a 26% do volume diário total de águas cinzas produzidas.

Diante dessa variabilidade, torna-se essencial compreender as características das águas cinzas para o planejamento de sistemas eficientes de tratamento e reúso. Optou-se pela utilização da Resolução COEMA nº 02/2017 (Padrões para reúso agrícola e florestal - Art. 39) em razão da inexistência de regulamentação específica equivalente no estado do Rio Grande do Norte, sendo está uma das principais referências nacionais para reúso agrícola.

A Tabela 1 apresenta diferentes características de qualidade das águas cinzas identificadas em pesquisas científicas, correlacionadas com os padrões estabelecidos pela Resolução nº 02/2017 do Conselho Estadual do Meio Ambiente do Ceará (COEMA), que dispõe sobre o reúso externo de efluentes sanitários para fins urbanos, agrícolas, ambientais e florestais.

Tabela 1 - Características de águas cinzas mistas e correlação com a COEMA 02/2017

Parâmetro	**Unidade**	**Valores médios da literatura (Afluente Bruto^{+})****	**COEMA**
pH	-	7,1	Entre 6,0 e 8,5
DBO	mg L^{-1}	195	até 120mg L^{-1}
DQO	mg L^{-1}	394	até 120mg L^{-1}
ST	mg L^{-1}	777	-
SST	mg L^{-1}	68	-
STD	mg L^{-1}	810,6	-
Turbidez	uT	80	-
TN	Mg L^{-1}	9,7	-
PT	Mg L^{-1}	5,5	-
CF	log_{10} UFC por 100 mL	4,5	log_{10} UFC por 100 mL
CT	log_{10} UFC por 100 mL	4,5	N/D
Ovos de geo-helmintos	ovos L^{-1}	-	N/D[1] / ≤ 1[1]

Fonte: Adaptado de Pidou*et al.*(2008), Larsen *et al*. (2013), Abdel-Shafy*et al*. (2014), Ghaitidak e Yadav (2015), Palmquist *et al.*(2015), Rajagopalan*et al*. (2020), van de Walle *et al*.(2023) e COEMA 02/2017.

Nota 1: Os valores apresentados na coluna 'Valores médios da literatura' referem-se às características das águas cinzas brutas (misturadas e sem tratamento), servindo como base para quantificar a carga poluidora inicial que justifica a necessidade do sistema de tratamento para atendimento aos padrões de reúso da Resolução COEMA nº 02/2017.

Nota 2: Legenda: pH - Potencial Hidrogeniônico; DBO - Demanda bioquímica de oxigênio; DQO - Demanda química de oxigênio;ST - sólidos totais; SST - sólidos suspensos totais; STD - sólidos totais dissolvidos; uT - Unidade de Turbidez; NT - Nitrogênio Total; PT - Fósforo Total; CF - Coliformes Fecais; CT - Coliformes Totais; e N/D - Não detectável.

Os principais fatores que influenciam as características físicas das águas cinzas provenientes de banheiros, como cor e turbidez, estão associados à presença de partículas de pele, cabelos, areia e fibras de tecidos, enquanto a condutividade elétrica está relacionada principalmente à presença de materiais dissolvidos, como sais e outros compostos iônicos (Mohan*et al*., 2024).Esses materiais sólidos podem provocar obstruções em tubulações e comprometer a eficiência dos sistemas de tratamento, tornando necessária sua remoção prévia para garantir o adequado funcionamento das unidades de reúso (May, 2009). Além disso, essas águas frequentemente apresentam compostos oriundos de produtos de higiene e cuidado pessoal, como shampoos, sabonetes, cremes, detergentes e outros agentes de limpeza, bem como resíduos orgânicos provenientes da higienização corporal e, em alguns casos, vestígios de urina e fezes (Delhiraja; Philip, 2020; Kadewa*et al*., 2020).

Outro setor responsável por significativa geração de águas cinzas é o de lavanderias, onde há intenso consumo de água associado ao uso de sabões, detergentes, alvejantes e amaciantes de roupas. Esse processo também contribui para a presença de elevadas quantidades de fibras têxteis provenientes do desgaste e da fricção de diferentes tipos de tecidos durante a lavagem, além de compostos químicos que podem alterar parâmetros como pH, DBO, DQO e salinidade (Ghaitidak; Yadav, 2013; Oteng-Peprah*et al*., 2018; van de Walle *et al*., 2023).

No ambiente da cozinha, o consumo de água ocorre em diferentes atividades, como lavagem de utensílios, higienização de alimentos, preparo de refeições e descarte de resíduos alimentares. Esse conjunto de usos resulta em águas cinzas com características bastante distintas, geralmente marcadas por maiores concentrações de matéria orgânica, óleos, gorduras, nutrientes e contaminantes não convencionais, além da presença de detergentes e outros produtos de limpeza (Ghaitidak; Yadav, 2013; BudeliSibali, 2025). Dessa forma, a implementação de sistemas adequados de tratamento e reúso torna-se essencial para promover o uso seguro e eficiente dessas águas em finalidades não potáveis (Boano*et al.*, 2020; van de Walle *et al*., 2023).

As águas cinzas também podem apresentar concentrações elevadas de espécies iônicas, como ânions e cátions, em função principalmente da presença de compostos utilizados em produtos de limpeza e higiene, como o sódio (Na^+), cloreto (Cl^-) e agentes branqueadores à base de boro (B), frequentemente presentes em detergentes líquidos, sabões em pó e produtos de cuidado pessoal (Friedler*et al.*, 2004; Oteng-Peprah*et al*., 2018). Por conseguinte, observa-se a ocorrência de valores consideráveis de salinidade, o que reforça a necessidade de manejo criterioso desses efluentes, especialmente quando destinados à irrigação agrícola. O uso contínuo de águas com elevada carga salina pode provocar alterações significativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, comprometendo sua fertilidade e a produtividade das culturas (Hijosa-Valsero*et al*., 2010).

Nesse contexto, a Tabela 2 apresenta diferentes concentrações de elementos químicos identificados em águas cinzas, correlacionadas com os limites máximos estabelecidos pela Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) para águas salobras de Classe 1, permitindo uma análise comparativa da qualidade desses efluentes e de seu potencial de reúso.

Tabela 2 - Elementos prevalentes em águas cinzas mistas

Parâmetro	**Literatura***	**CONAMA nº 357/2005**
Cl^-	181mg L^{-1}	250 mg L^{-1}
Na^+	162,1 mg L^{-1}	-
S	137,5mg L^{-1}	-
Mg^{2+}	55,7 mg L^{-1}	-
K^+	9,0mg L^{-1}	-
Al	2,4mg L^{-1}	1,5 mg L^{-1}
Fe	0,36mg L^{-1}	0,3 mg L^{-1}
Zn	0,064mg L^{-1}	0,12 mg L^{-1}
Cu	0,062 mg L^{-1}	0,0078 mg L^{-1}

Fonte: Adaptados de Larsen *et al*. (2013); Abdel-Shafy*et al*. (2014); Palmquist e Hanaeus (2005);CONAMA(2005)

Nota 1: Cl^-- cloreto; Na - sódio; S - enxofre; Mg - magnésio; K - potássio; Al - Alumínio; Fe - ferro; Zn - zinco; Cu - cobre.

Nota 2: Para fins de comparação, todos os valores foram convertidos para mg L^{-1}, seguindo as equivalências da Resolução CONAMA 357/2005.

A composição microbiológica das águas cinzas tende a apresentar menores concentrações de microrganismos patogênicos quando comparada às águas negras, devido à segregação dos efluentes provenientes dos vasos sanitários, principais responsáveis pela elevada carga fecal e pela presença de agentes contaminantes de maior risco sanitário (Eriksson *et al*., 2002). No entanto, apesar de apresentarem menor potencial de contaminação que as águas residuárias domésticas convencionais, as águas cinzas podem conter microrganismos potencialmente patogênicos, introduzidos principalmente pelo contato corporal, higiene pessoal e manipulação inadequada de alimentos (Oteng-Peprah; Acheampong; Devries, 2018).

Nesse contexto, estudos da literatura relatam que as águas cinzas podem apresentar concentrações de microrganismos indicadores e patogênicos da mesma ordem de grandeza das observadas em esgotos domésticos após tratamento secundário. Em águas cinzas brutas, as concentrações de coliformes fecais podem variar de aproximadamente 0 a 10^6-10^7 UFC/100 mL, enquanto *Pseudomonas aeruginosa* e *Staphylococcus aureus* podem atingir concentrações da ordem de10^2 e 10^5 UFC/100 mL, respectivamente (Friedler; Gilboa, 2010).

Essa variabilidade está relacionada, entre outros fatores, à origem das águas cinzas e à contribuição de efluentes provenientes de cozinhas, banheiros e lavanderias. Dessa forma, o monitoramento microbiológico torna-se fundamental para garantir a segurança sanitária do reúso, especialmente em aplicações que envolvam irrigação ou possibilidade de contato

humano. As principais informações sobre a ocorrência de microrganismos indicadores e patogênicos em águas cinzas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição microbiana de águas cinzas mistas disponibilizadas na literatura

Parâmetro	Unidade	Literatura*	Faixa de ocorrência
Coliformes fecais	$\log_{10}$ UFC/100 mL	4,1	3,6 - 5,8
Coliformes totais	$\log_{10}$ UFC/100 mL	5,8	3,0- 6,7
Enterococos fecais	$\log_{10}$ UFC/100 mL	4,7	1,4 - 9,0
Escherichia coli	$\log_{10}$ UFC/100 mL	4,1	3,6 - 6,3
Salmonella spp.	$\log_{10}$ UFC/100 mL	3,5	0 - 3,9

Fonte: Adaptados de Oteng-Peprah*et al.*(2018); Turner *et al*. (2018); e Ottoson *et al*. (2003).

3.4 Riscos sanitários e agronômicos associados ao reúso de águas cinzas

O reúso de águas cinzas torna-se cada vez mais relevante diante do aumento da escassez hídrica em diferentes regiões do mundo, especialmente em áreas semiáridas e com elevada pressão sobre os recursos hídricos disponíveis. No entanto, sua utilização sem tratamento adequado pode representar riscos significativos à saúde humana, uma vez que esse tipo de efluente pode conter microrganismos patogênicos capazes de comprometer a segurança sanitária do reúso (Ramos Marques; Ribeiro Ide; Loureiro Paulo, 2018).

Mesmo após o tratamento, a presença residual de patógenos ainda pode representar riscos durante práticas de reutilização, especialmente na irrigação de culturas alimentares, onde há maior possibilidade de contato indireto com os alimentos e com os trabalhadores rurais (Kusumawardhana*et al*., 2021). Por essa razão, o controle microbiológico torna-se um dos principais critérios para a viabilidade e segurança do reúso agrícola.

As principais fontes de contaminação microbiológica das águas cinzas estão associadas à introdução indireta de resíduos fecais no sistema doméstico, principalmente durante atividades de higiene corporal, lavagem de roupas e manipulação de alimentos. Durante o banho, resíduos fecais presentes na pele podem ser carreados para o efluente; na lavanderia, roupas íntimas, roupas infantis e tecidos contaminados contribuem para a presença de microrganismos; e, na cozinha, alimentos contaminados e resíduos orgânicos provenientes da pia também representam importantes fontes de patógenos (Ottoson*et al*., 2003; Boyjoo*et al*., 2013).

Além disso, secreções corporais, como mucos nasais, também podem contribuir para a presença de agentes infecciosos nas águas cinzas, ampliando o potencial de contaminação

microbiológica (Ottoson*et al*., 2003). A presença de patógenos entéricos está diretamente relacionada a essa introdução difusa e indireta de matéria fecal, tornando essencial a adoção de sistemas eficientes de tratamento e desinfecção.

Estudos sobre águas cinzas brutas identificaram concentrações relativamente elevadas de microrganismos como *Salmonella spp.*, *Staphylococcus aureus* e coliformes fecais, com valores que podem atingir até 10^4 UFC por 100 mL, além da presença de *Escherichia coli*, registrada em concentrações de até 10^6 UFC por 100 mL (Oteng-Peprah*et al.*, 2018; Turner et al.; Ottoson*et al*., 2003). Também foram observadas ocorrências de protozoários, helmintos e outros agentes de contaminação microbiológica, reforçando a necessidade de monitoramento constante da qualidade sanitária dessas águas (Ottoson*et al*., 2003).

Dessa forma, embora o reúso de águas cinzas represente uma alternativa importante para a conservação dos recursos hídricos, sua aplicação deve estar associada a práticas adequadas de tratamento, monitoramento e controle sanitário, de modo a garantir a proteção da saúde humana e a sustentabilidade ambiental.

3.5 Arcabouço normativo internacional e nacional para reuso agrícola de águas cinzas

3.5.1 Arcabouço normativo internacional

A Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou, em 2006, o documento *Guidelines for the Safe Use ofWastewater, Excreta andGreywater*, considerado uma das principais referências internacionais sobre o reúso seguro de águas residuárias, incluindo as águas cinzas (WHO, 2006). Essas diretrizes estabeleceram uma nova abordagem para o gerenciamento sanitário do reúso, fundamentada não apenas em limites rígidos de qualidade, mas principalmente na avaliação dos riscos à saúde humana e ambiental.

Entre os principais aspectos abordados pelo documento, destacam-se o estabelecimento de metas baseadas em risco, a adoção do princípio de múltiplas barreiras de proteção e a consideração integrada de fatores sanitários, ambientais e sociais (WHO, 2006). O conceito de múltiplas barreiras prevê que a segurança do reúso não depende exclusivamente do tratamento da água, mas também de práticas complementares, como métodos adequados de aplicação, restrições de uso, controle operacional e educação sanitária dos usuários (WHO, 2006).

Posteriormente, a OMS publicou o documento *Potable Reuse: Guidance for Producing Safe Drinking-water* (WHO, 2017), consolidando orientações específicas para o reúso potável direto e indireto, ampliando o debate sobre a segurança sanitária da reutilização da água em

diferentes níveis de exigência. Embora essas diretrizes não possuam caráter legal vinculante, elas servem como importante base técnica para a formulação de legislações e normas nacionais em diversos países.

Diferentemente de algumas legislações que estabelecem valores fixos universais para parâmetros de qualidade, a OMS não define limites únicos aplicáveis a todos os cenários de reúso de águas cinzas. Sua abordagem é baseada na Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (QMRA -*Quantitative Microbial Risk Assessment*), que permite estimar os riscos potenciais à saúde humana conforme o tipo de uso, o nível de exposição e a vulnerabilidade dos usuários (WHO, 2006).

Dessa forma, os critérios de qualidade recomendados variam de acordo com a finalidade do reúso, considerando aspectos como irrigação agrícola, uso urbano, descarga sanitária ou reúso potável. Essa metodologia torna o processo mais flexível e eficiente, permitindo a adaptação das exigências sanitárias às condições locais e aos diferentes contextos de aplicação. No Quadro 1, são apresentados os principais parâmetros e critérios recomendados pela OMS para o reúso seguro de águas cinzas.

Quadro 1 - Principais parâmetros e critérios recomendados para o reúso seguro de águas cinzas

Categoria Parâmetros	**Critérios e Recomendação Técnica**
Microbiológicos	Prioriza indicadores microbiológicos, pois o principal risco do reúso é a transmissão de patógenos. Prioridade máxima
Meta de risco tolerável	$\leq 10^{-6}$ DALY por pessoa por ano.
Redução de Patógenos (Log Removal Targets)	Em vez de apenas limites de concentração, a OMS recomenda reduções logarítmicas mínimas, dependendo do tipo de uso.
	Para reúso agrícola com contato humano potencial:
	Vírus: 6 log (99,9999%);Bactérias: 5 log; eProtozoários: 4 log.
	Para usos urbanos com maior exposição (ex.: irrigação de jardins públicos):
	Vírus: 6 - 7 log (99,9999%);Bactérias: 5- 6 log; eProtozoários: 4 - 5 log.
Parâmetros Físico-Químicos	Recomenda controle de parâmetros físico-químicos para evitar impactos ambientais e operacionais
pH	Faixa recomendada: 6,0 - 9,0
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Recomenda-se DBO < 10 - 30 mg/L para usos urbanos
Sólidos Suspensos Totais (SST)	< 10 - 30 mg/L para sistemas com irrigação por aspersão
Turbidez	< 2 NTU para reúso potável indireto
	< 5 NTU para usos urbanos não potáveis
Nutrientes	Nitrogênio e fósforo devem ser controlados para evitar eutrofização.
Parâmetros Químicos Emergentes	Especialmente relevantes para águas cinzas, que possuem: Detergentes, Surfactantes, Conservantes, Cosméticos
	Ainda não há limites universais fixos, mas recomenda-se avaliação de risco local
Reúso Potável (Direto ou Indireto)	Para reúso potável:
	E. coli: ausência em 100 mL
	Turbidez: < 1 NTU (idealmente < 0,5 NTU)
	Monitoramento rigoroso de vírus entéricos

Fonte: Adaptado de WHO (2006); Organização Mundial da Saúde (2017);DALY: Disability-Adjusted Life Year.

Com base no exposto, observa-se que o estabelecimento de um arcabouço normativo para o reúso de águas cinzas é fundamental para garantir a segurança sanitária, a proteção ambiental e a viabilidade técnica dessa prática, especialmente em regiões marcadas pela escassez hídrica. A formulação de políticas públicas, normas técnicas e diretrizes específicas permite que o reúso deixe de ser apenas uma alternativa pontual e passe a integrar estratégias estruturadas de gestão hídrica, fornecendo critérios claros para sua implementação, monitoramento e controle (Lanchipa -Ale *et al*., 2024).

No cenário internacional, alguns países se destacam como pioneiros no desenvolvimento de normas voltadas ao manejo e ao reúso de águas cinzas. A Austrália, por exemplo, foi uma das primeiras nações a estabelecer diretrizes específicas para esse tipo de efluente, abrangendo desde dispositivos simples de desvio da água até sistemas mais complexos de tratamento e reaproveitamento (NSW Health, 2010). Essas normativas foram impulsionadas, principalmente, pela necessidade de enfrentamento da escassez de água doce em regiões áridas e semiáridas, consolidando o reúso como uma prática estratégica de segurança hídrica.

Nos Estados Unidos, o reúso de águas cinzas é regulamentado com base em normas técnicas desenvolvidas pela ANSI (American National Standards Institute) e pela NSF (National Sanitation Foundation), com destaque para a norma NSF/ANSI 350 (2022), que estabelece critérios para sistemas descentralizados de tratamento e reúso local. Essa norma é direcionada principalmente para usos não potáveis, como descarga de vasos sanitários, irrigação paisagística e outras aplicações urbanas, garantindo padrões mínimos de qualidade físico-química e microbiológica.

A Jordânia também apresenta avanços importantes nessa temática, especialmente em razão de sua elevada vulnerabilidade hídrica. O país adota padrões baseados nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006), aplicadas ao contexto local, estabelecendo limites para parâmetros como nitrogênio total, nitrato e Demanda Química de Oxigênio (DQO), principalmente para o reúso em irrigação de áreas verdes e agricultura (Ministryof Waterand Irrigation, 2015). Essas experiências internacionais demonstram que a regulamentação adequada é indispensável para ampliar a aceitação social e a segurança operacional do reúso.

Em contraste, países como o Peru ainda apresentam significativo atraso no desenvolvimento de políticas públicas e diretrizes específicas para o reúso de águas cinzas. A ausência de padrões nacionais claros representa um obstáculo para a expansão dessa prática, especialmente em regiões hiperáridas, onde o reúso poderia desempenhar papel fundamental na segurança hídrica e no desenvolvimento sustentável (Lanchipa-Ale *et al*., 2024). Estudos

apontam que a incorporação obrigatória de sistemas de reciclagem de água em novas construções poderia representar um importante avanço normativo e estrutural.

A padronização técnica também desempenha papel essencial na classificação das águas cinzas, permitindo diferenciá-las entre águas cinzas claras (*light greywater*) e águas cinzas escuras (*darkgreywater*), conforme sua origem e nível de contaminação (Oteng-Peprah*et al*., 2018). As águas cinzas claras são provenientes, principalmente, de chuveiros, lavatórios e banheiras, apresentando menor carga de matéria orgânica e de microrganismos patogênicos. Por sua vez, as águas cinzas escuras originam-se de atividades realizadas em cozinhas e lavanderias, caracterizando-se por concentrações mais elevadas de gorduras, detergentes, matéria orgânica e sólidos suspensos. Essa distinção influencia diretamente a complexidade do tratamento necessário e define as possibilidades de reúso, seja em ambientes internos, como descargas sanitárias, ou externos, como irrigação agrícola e paisagística. Dessa forma, as normativas não apenas garantem maior segurança microbiológica e ambiental, mas também favorecem a aceitação social e a ampliação do uso sustentável desse recurso.

3.5.2 Arcabouço normativo brasileiro

No Brasil, o cenário regulatório para o reúso de águas ainda é caracterizado pela ausência de uma legislação federal única e detalhada, estruturando-se sobre um conjunto fragmentado de normas e diretrizes. Entre os marcos legais, destaca-se a Lei nº 14.546/2023, que institui incentivos para o aproveitamento de águas pluviais e o reúso não potável de águas cinzas em novas edificações. Embora represente um avanço institucional ao fomentar a prática, essa lei não define parâmetros técnicos específicos, o que mantém lacunas quanto a padrões nacionais obrigatórios de qualidade.

Historicamente, as diretrizes gerais para a prática no país são norteadas pela Resolução CNRH nº 54/2005, que estabelece as modalidades e critérios para o reúso direto não potável. No âmbito técnico, a padronização recai sobre as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Recentemente, em abril de 2024, a ABNT NBR 17076:2024 2024 (Efluentes de tanques sépticos - Tratamento complementar e disposição final) substituiu e unificou as antigas ABNT NBR 13969:1997 e ABNT NBR 7229:1993, estabeleceu os requisitos atuais para o tratamento complementar e a disposição final de efluentes provenientes de tanques sépticos, contribuindo para o manejo adequado desses efluentes em sistemas descentralizados.

Complementarmente, a ABNT NBR 15575/2013 (Norma de Desempenho) estabelece requisitos de desempenho para edificações habitacionais, incluindo aspectos relacionados à sustentabilidade e ao uso eficiente dos recursos. Já os critérios de qualidade da água para usos

restritivos não potáveis em edificações são apresentados pela ABNT NBR 16783:2019 (Tabela 4).

Tabela 4 - Parâmetros de qualidade de água para usos restritivos não potáveis

Parâmetro	**NBR 16783/2019**	**NBR 15527/2019 (água de chuva)**
Turbidez	≤ 5,0 uT	≤ 5,0 uT
pH	6,0 a 9,0	6,0 - 9,0
Coliformes termotolerantes	≤ 200 NMP/100 mL	≤ 200 NMP/100 mL
Sólidos dissolvidos totais	≤ 2000 mgL^{-1}	Não estabelece
Cloro residual livre	0,5 a 5,0 mg L^{-1}	0,5 a 2,0 mg/L (recomendado)
DBO_5	≤ 20 mgO_2L^{-1}	Não estabelece
Condutividade elétrica	≤ 3200 μS/cm	Não estabelece

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16783:2019; ABNT NBR 15527:2019.

A comparação entre diferentes referências normativas demonstra que os critérios de qualidade da água variam conforme a finalidade de uso. A ABNT NBR 16783:2019 apresenta requisitos específicos para o aproveitamento de fontes alternativas de água não potável em edificações, incluindo águas cinzas, enquanto a ABNT NBR 15527:2019 é direcionada ao aproveitamento de água de chuva. Observa-se que ambas as normas estabelecem limites semelhantes para pH e turbidez, porém a ABNT NBR 16783:2019 apresenta parâmetros adicionais relacionados à matéria orgânica e à qualidade microbiológica, tornando-se uma referência mais abrangente para sistemas de reúso de águas cinzas.

Para além das normas técnicas, a gestão de águas residuárias no Brasil deve observar as diretrizes estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), especialmente aquelas relacionadas ao controle e às condições para o lançamento de efluentes líquidos em corpos de água receptores. Nesse contexto, destaca-se a Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre as condições, os parâmetros, os padrões e as diretrizes para a gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, alterando e complementando a Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2011). Embora essa resolução não estabeleça critérios específicos para o reúso de águas residuárias, seus parâmetros e condições de lançamento constituem referência importante para a gestão ambiental dos efluentes e para a avaliação dos processos de tratamento, especialmente quando houver possibilidade de lançamento em corpos hídricos.

Entre as definições e padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, destacam-se:

- Definição de Efluentes: Caracteriza as águas residuárias como aquelas provenientes de atividades domésticas, industriais ou agropecuárias que, após o uso, apresentam carga poluente e demandam tratamento prévio ao lançamento no meio ambiente;
- Padrões de Lançamento: Estipula limites máximos de concentração para diversos parâmetros físico-químicos e biológicos, assegurando que o lançamento do efluente tratado em corpos hídricos não comprometa a qualidade do receptor.

Nesse sentido, na Tabela 5 seguem informações de limites máximos para diferentes parâmetros que as águas residuárias devem apresentar antes de seu lançamento em corpos receptores.

Tabela 5 - Padrões de lançamento

Parâmetro	**Limite Máximo**
pH	entre 5,0 e 9,0
DBO_5	Até 120 mg L^{-1}
SST	150 mg L^{-1}
O&G- óleos minerais	20 mg L^{-1}
O&G- óleos minerais e gorduras animais	50 mg L^{-1}
CTe (quando aplicável)	até 1000 NMP/100 mL
T	até 40°C

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 430/2011 (2011).
Nota : pH - potencial hidrogeniônico; DBO_5 - demanda bioquímica de oxigênio; SST - sólidos suspensos totais; O&G - óleos e graxas; CTe - coliformes termotolerantes; T - temperatura.

Os limites de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 podem apresentar maior restritividade a depender da classificação do corpo receptor (como rios, lagos e reservatórios) conforme os enquadramentos definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como as condições e padrões de lançamento de efluentes (Brasil, 2005; Brasil, 2011).

Embora o foco principal da Resolução CONAMA nº 430/2011 esteja relacionado às condições e aos padrões para o lançamento de efluentes em corpos de água receptores, seus dispositivos estabelecem requisitos importantes para o controle ambiental dos efluentes, especialmente quanto à necessidade de tratamento e ao atendimento de padrões de lançamento (Brasil, 2011). Ressalta-se, contudo, que a referida resolução não estabelece critérios específicos para o reúso de águas residuárias, devendo as práticas de reúso observar

regulamentações e normas específicas aplicáveis à finalidade pretendida, incluindo normas técnicas e regulamentações estaduais pertinentes.

Nesse contexto, o reúso pode ser classificado como direto, quando o efluente tratado é destinado imediatamente para fins específicos, como irrigação agrícola, lavagem de pisos ou descargas sanitárias, sem lançamento prévio em corpos d'água; ou indireto, quando o efluente é lançado no meio hídrico e posteriormente captado para novo aproveitamento (CNRH, 2005; WHO, 2006). Em ambos os casos, a responsabilidade pela conformidade da qualidade do efluente recai sobre o gerador, que deve assegurar o atendimento aos padrões legais vigentes por meio de monitoramento laboratorial periódico e do controle operacional adequado dos sistemas de tratamento e reúso (Brasil, 2011; WHO, 2006).

No contexto do reúso agrícola de águas cinzas, os parâmetros de qualidade devem ser definidos de acordo com a finalidade de uso e com os riscos associados à exposição humana e ambiental, não sendo aplicável, de forma direta, o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Essa normativa é destinada ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano e estabelece os respectivos padrões de potabilidade, abrangendo sistemas de abastecimento e soluções alternativas de abastecimento de água. Dessa forma, seus critérios não devem ser utilizados como requisitos específicos para o reúso agrícola, embora possam servir como referência comparativa em estudos que discutam diferentes níveis de qualidade da água (Brasil, 2021).

3.5.3 Regulamentações Estaduais

A ausência de um marco regulatório federal específico, detalhado e consolidado para o reúso de águas cinzas e águas residuárias no Brasil tem impulsionado diversos estados a desenvolverem legislações próprias, buscando atender às demandas regionais relacionadas à segurança hídrica, ao desenvolvimento econômico e à sustentabilidade ambiental. Essa descentralização normativa reflete a crescente necessidade de soluções locais para o enfrentamento da escassez de água, especialmente em regiões mais vulneráveis, como o semiárido nordestino (Brasil, 2005; ANA, 2021).

Nesse contexto, destacam-se iniciativas estaduais como as do Rio Grande do Norte, Ceará, Bahia e Espírito Santo, que apresentam diferentes abordagens quanto ao escopo, à finalidade e ao nível de detalhamento técnico das normas aplicáveis ao reúso. Embora essas regulamentações representem avanços significativos na gestão dos recursos hídricos, ainda persistem desafios relacionados à padronização de critérios de qualidade, à segurança sanitária

e à harmonização com normas federais e diretrizes internacionais, como aquelas estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006).

Recentemente, o estado do Rio Grande do Norte, avançou significativamente em sua estrutura legal com a promulgação da Lei nº 11.332, de 30 de dezembro de 2022, que institui a política estadual de reúso de água não potável. Essa legislação fundamenta-se na busca por alternativas para a oferta hídrica, visando reservar águas de melhor qualidade para usos mais nobres e promover o aumento da produção de alimentos por meio da reciclagem de nutrientes de efluentes tratados, especialmente na região semiárida. A lei abrange diversas modalidades, como o reúso doméstico não potável, agrícola, florestal e urbano, permitindo tanto o reúso interno (no próprio empreendimento) quanto o externo. No que tange à governança, a norma estabelece que a fiscalização compete ao IDEMA, enquanto o monitoramento da qualidade da água e o automonitoramento são coordenados pelo IGARN, sob as diretrizes da SEMARH (Rio Grande do Norte, 2022).

O Estado do Ceará se destaca por possuir uma das legislações mais abrangentes sobre o tema, instituída por meio da Lei nº 16.033, de 20 de junho de 2016, que estabelece a Política Estadual de Reúso de Água Não Potável. Essa legislação representa um importante avanço na regulamentação estadual, ao definir conceitos fundamentais como água residuária, água de reúso, reúso interno e reúso externo, além de contemplar diferentes modalidades de aplicação, incluindo usos urbanos, agrícolas, florestais, industriais, ambientais e aquícolas (Ceará, 2016).

Entre os principais objetivos da Política Estadual do Ceará de Reúso destacam-se a promoção do uso racional dos recursos hídricos, a redução da demanda por água potável em atividades que não exigem padrão de potabilidade, a proteção da saúde pública e do meio ambiente, além da integração com os instrumentos da Política Estadual de Recursos Hídricos. A legislação também estabelece, de forma expressa, a vedação do reúso para abastecimento humano direto, restringindo sua aplicação exclusivamente a fins não potáveis, em consonância com os princípios de segurança sanitária e prevenção de riscos ambientais (Ceará, 2016).

Complementando esse marco legal, destaca-se a Resolução nº 02/2017 do Conselho Estadual do Meio Ambiente do Ceará (COEMA), que estabelece critérios técnicos mais específicos para o reúso externo de efluentes sanitários. Em seu Capítulo III, a normativa define que o reúso para fins urbanos, agrícolas, ambientais, florestais e outros usos deverá obedecer a parâmetros físico-químicos e microbiológicos específicos (Tabela 6), visando assegurar a proteção da saúde humana, a preservação ambiental e a viabilidade operacional dos sistemas de reúso (COEMA/CE, 2017).

Tabela6 - Padrões de água para reúso agrícola conforme a COEMA/CE (2017)

Parâmetro	Limite Máximo	Observações
pH	Entre 6,0 e 8,5	Fins agrícolas e florestais
CE	Até 3,0 dSm^{-1}	Fins agrícolas e florestais
SST	até 100mg L^{-1}	Para lançamento do efluente
DBO_5	até 120mg L^{-1}	Para lançamento do efluente- 05 dias, 20ºC
DQO	até 120mg L^{-1}	Para lançamento do efluente
O&G	até 50 mg L^{-1}	Para lançamento do efluente
NH_4^+ -N	até 20mg L^{-1}	Para lançamento do efluente, pH ≤8
CT	N/D	Culturas a serem consumidas cruas cuja parte consumida tenha contato direto com a água de irrigação

Fonte**:** COEMA/CE (2017).

Nota: N/D - Não Detectável; pH - potencial hidrogeniônico; CE - condutividade elétrica; SST - sólidos suspensos totais; DBO_5 - demanda bioquímica de oxigênio; DQO - demanda química de oxigênio; O&G - óleos e graxas; NH_4^+-N - nitrogênio amoniacal; CT - coliformes termotolerantes.

No Estado da Bahia, a regulamentação do reúso ocorre por meio da Resolução CONERH nº 75, de 29 de julho de 2010, que estabelece critérios e diretrizes para a prática do reúso direto não potável de água, com ênfase nos usos agrícolas e florestais. A normativa apresenta um enfoque predominantemente setorial, priorizando a irrigação de culturas agrícolas, o reflorestamento e a produção vegetal com controle da exposição humana, refletindo a forte dependência do setor agropecuário para a economia estadual e a necessidade de alternativas hídricas em regiões sujeitas à escassez e irregularidade pluviométrica (Bahia, 2010).

Essa abordagem evidencia a preocupação com o uso racional dos recursos hídricos e com a busca por fontes alternativas de abastecimento para atividades produtivas, especialmente em áreas semiáridas. No entanto, a resolução não apresenta parâmetros universalizados e detalhados de qualidade da água para reúso, tornando necessária a realização de análises específicas e o licenciamento ambiental individualizado para cada empreendimento (Bahia, 2010).

No Estado do Espírito Santo, a regulamentação do reúso de água ocorre por meio da Lei nº 10.487, de 13 de janeiro de 2016, que dispõe sobre o reúso de efluentes provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), com destaque para sua aplicação no setor industrial. A legislação tem como principais objetivos a redução do consumo de água potável em processos

produtivos, o incentivo à sustentabilidade hídrica no setor industrial e o estímulo à formação de parcerias público-privadas para a implantação de sistemas de reúso (Espírito Santo, 2016).

Além do uso industrial, a norma também permite a utilização desses efluentes tratados em áreas verdes, serviços urbanos e outras finalidades não potáveis, ampliando seu campo de aplicação e fortalecendo a perspectiva de gestão integrada dos recursos hídricos. Essa iniciativa demonstra o reconhecimento do reúso como instrumento estratégico para a preservação dos mananciais e para a promoção do desenvolvimento sustentável (Espírito Santo, 2016).

Comparadas às diretrizes internacionais estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS), percebe-se que as legislações estaduais brasileiras ainda apresentam um caráter mais institucional e programático do que propriamente técnico. A OMS adota uma abordagem baseada na Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (QMRA), estabelecendo metas sanitárias fundamentadas em risco aceitável à saúde humana, como o limite de $\leq 10^{-6}$ DALY (*DisabilityAdjusted Life Years*) por pessoa por ano, além da adoção do princípio de múltiplas barreiras de proteção (WHO, 2006).

Dessa forma, embora as legislações estaduais do Ceará, Bahia e Espírito Santo representem importantes avanços no desenvolvimento da política de reúso de águas no Brasil, a ausência de critérios técnicos padronizados, metas sanitárias claras e maior harmonização com diretrizes nacionais e internacionais ainda limita a efetividade dessas normas. A consolidação de um marco regulatório federal mais robusto e tecnicamente detalhado torna-se, portanto, essencial para fortalecer a segurança jurídica, sanitária e ambiental do reúso de águas cinzas e residuárias no país.

3.6 Sistemas de Tratamento de Águas Cinzas

O tratamento das águas cinzas visa reduzir carga orgânica, sólidos, nutrientes e patógenos, possibilitando seu reúso para irrigação, lavagem externa e descarga sanitária. Sistemas biológicos são amplamente adotados devido à simplicidade e baixo custo (Abdel-Shafy; Al-Sulaiman, 2014).

O tratamento de águas cinzas constitui um campo em constante evolução, abrangendo uma ampla variedade de tecnologias destinadas à remoção de contaminantes físicos, químicos e microbiológicos. A escolha do método mais adequado depende diretamente da qualidade da água cinza bruta, da finalidade do reúso pretendido e, sobretudo, das condições socioeconômicas, ambientais e operacionais do local de aplicação (Jefferson *et al.*, 2004; Gross *et al*., 2007).

3.6.1 Panorama Geral das Tecnologias de Tratamento

As tecnologias podem ser classificadas em sistemas físicos (filtração e sedimentação), químicos (desinfecção e coagulação), biológicos (wetlands e biofiltros) ou combinados.O Quadro 2apresenta os tipos de sistemas e sua definição.

Quadro 2 - Tipos de sistemas de tratamento de águas cinzas, definição e exemplos

Tipo de Sistema	**Definição e exemplo**
Físicos	Filtração: remoção de sólidos por areia, carvão ou membranas
	Sedimentação: separação gravitacional de partículas
Químicos	Desinfecção por cloro ou ozônio
	Coagulação e floculação para remoção de turbidez e cor
Biológicos	Wetlands construídos com macrófitas como *Typha* e *Phragmites*
	Lagoas de estabilização com baixo custo e boa eficiência
	Biofiltros aerados com biofilmes microbianos.
Combinados	Integram processos físicos, biológicos e químicos, aumentando a eficiência de remoção

Fonte: Adaptado de Eriksson*et al*. (2002); Mara (2004); Gross *et al* (2007); Li*et al*. (2009); Friedler e Gilboa (2010).

Entre as várias tecnologias empregadas no tratamento de águas cinzas, destacam-se ps sistemas biológicos, como filtros plantados, tecnologias baseadas na natureza, biorreatores de membrana e biofilmes, além de métodos físico-químicos como filtração por membranas, processos de sorção e troca iônica, e desinfecção por radiação ultravioleta (UV). A combinação dessas tecnologias visa produzir água tratada dentro dos parâmetros aceitáveis para reúso não potável, como irrigação paisagística, descargas sanitárias ou limpeza urbana (Wang e Kim, 2023, p. 5).

Os sistemas biológicos representam a base do tratamento de águas cinzas, tendo como principal objetivo a degradação da matéria orgânica dissolvida e suspensa, podendo promover a remoção parcial de nutrientes e de microrganismos presentes no efluente (Jefferson *et al*., 2004). Esses sistemas utilizam a atividade de microrganismos para promover a estabilização da matéria orgânica e são amplamente aplicados em soluções descentralizadas devido à sua eficiência e viabilidade econômica.

Entre as principais tecnologias biológicas, destacam-se os sistemas baseados na natureza, frequentemente preferidos em cenários descentralizados e em países em

desenvolvimento. Um exemplo importante são os wetlands construídos, que utilizam plantas aquáticas (macrófitas) associadas a leitos de brita, areia ou outros materiais filtrantes para remover poluentes por meio de processos físicos, químicos e biológicos. Esses sistemas são reconhecidos por sua simplicidade operacional, baixo consumo de energia e reduzido custo de manutenção, tornando-se especialmente adequados para áreas rurais e sistemas domésticos de reúso (Gross *et al*., 2007).

Além disso, os wetlands construídos apresentam elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, especialmente em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais. No entanto, a remoção de microrganismos patogênicos pode ser variável, o que frequentemente exige a aplicação de etapas complementares de desinfecção quando o reúso envolve maior risco sanitário, como na irrigação irrestrita ou no uso urbano com contato humano indireto (Pradhan*et al*., 2020).

As tecnologias físico-químicas e os sistemas de membranas são geralmente empregados para alcançar padrões mais elevados de qualidade do efluente, funcionando, na maioria das vezes, como etapas de polimento após o tratamento biológico (Pidou*et al*., 2008; Boano*et al.*, 2020). Essas técnicas são especialmente indicadas quando o objetivo é o reúso em aplicações mais restritivas, que exigem maior controle microbiológico e melhor qualidade físico-química da água tratada.

Entre essas tecnologias, destacam-se os Biorreatores de Membrana (MBR - *MembraneBioreactors*), que combinam o tratamento biológico convencional com a separação sólido-líquido por meio de membranas de microfiltração ou ultrafiltração. Esse processo permite a produção de um efluente de qualidade superior, praticamente livre de sólidos suspensos e com significativa redução de bactérias e outros microrganismos, sendo amplamente utilizado em situações onde há limitação de espaço e elevada exigência de qualidade para reúso (Wang; Kim, 2023).

A filtração por membranas também inclui processos como microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF), que são empregados na remoção de sólidos finos, coloides, matéria orgânica residual e microrganismos. Essas tecnologias apresentam elevada eficiência operacional e contribuem significativamente para a melhoria da qualidade final da água de reúso, embora seus custos de implantação e manutenção sejam mais elevados quando comparados aos sistemas naturais (Luo*et al*., 2018).

A desinfecção é a etapa final e essencial para a segurança microbiológica, especialmente no reúso agrícola irrestrito ou em descargas sanitárias. A radiação ultravioleta é um método de desinfecção popular que inativa microrganismos sem o uso de produtos químicos e sem a

produção de subprodutos de desinfecção. Sua eficácia depende criticamente da turbidez do efluente; portanto, é fundamental que o pré-tratamento remova bem os sólidos (Wang; Kim, 2023). Já a cloração é eficaz, contudo, a presença de matéria orgânica no efluente pode reduzir a capacidade de tratamento e gerar subprodutos indesejados de desinfecção. Estudos indicam que a cloração de águas residuárias pode levar à formação de contaminantes químicos como os trihalometanos (THM), a exemplo do clorofórmio, e outros subprodutos como a N-nitroso dimetilamina (NDMA), resultantes da interação do cloro com a carga orgânica e poluentes traços (FAO, 2010).

A utilização de tecnologias avançadas de tratamento de águas residuárias, como os processos de separação por membranas (a exemplo da microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa), ainda apresenta limitações para aplicação em comunidades rurais do semiárido, especialmente em razão dos custos de implantação, operação e manutenção. Estudos que avaliam a sustentabilidade de sistemas de tratamento em regiões com recursos limitados destacam que, embora soluções tecnológicas mais sofisticadas sejam empregadas em determinados contextos urbanos, sua adoção em áreas rurais pode ser dificultada pela dispersão populacional, pela necessidade de infraestrutura adequada e pela disponibilidade limitada de recursos financeiros e técnicos (Almeida; Silva; Moreira, 2024).

Entre essas tecnologias, os sistemas baseados em membranas requerem investimento inicial elevado e podem apresentar custos operacionais significativos, associados, entre outros fatores, ao consumo de energia para bombeamento e à necessidade de limpeza e manutenção das membranas (Pradhan*et al.,* 2020). Além disso, sua operação pode demandar mão de obra especializada, enquanto o acesso a peças de reposição e assistência técnica pode ser limitado em áreas remotas, constituindo um desafio adicional à sua implementação e continuidade operacional (Gross *et al*., 2007).

Uma das soluções mais empregadas para o tratamento descentralizado e sustentável (tanto no semiárido quanto em outras áreas rurais) foca nos filtros plantados e filtros de areia/cascalho. Tais sistemas são mais robustos, requerem pouca ou nenhuma energia e podem ser operados e mantidos por pessoal com treinamento básico, garantindo a continuidade do reúso (Jefferson *et a*l., 2004).

A escolha da tecnologia mais adequada depende de fatores como a finalidade do reúso, o volume e a variabilidade da geração de águas cinzas, os custos operacionais e a aceitação social. A implementação dessas soluções contribui para a economia de água potável**,** redução da carga nas estações de tratamento convencionais e maior resiliência hídrica, principalmente em áreas com escassez de recursos (Jefferson *et al*., 2004).

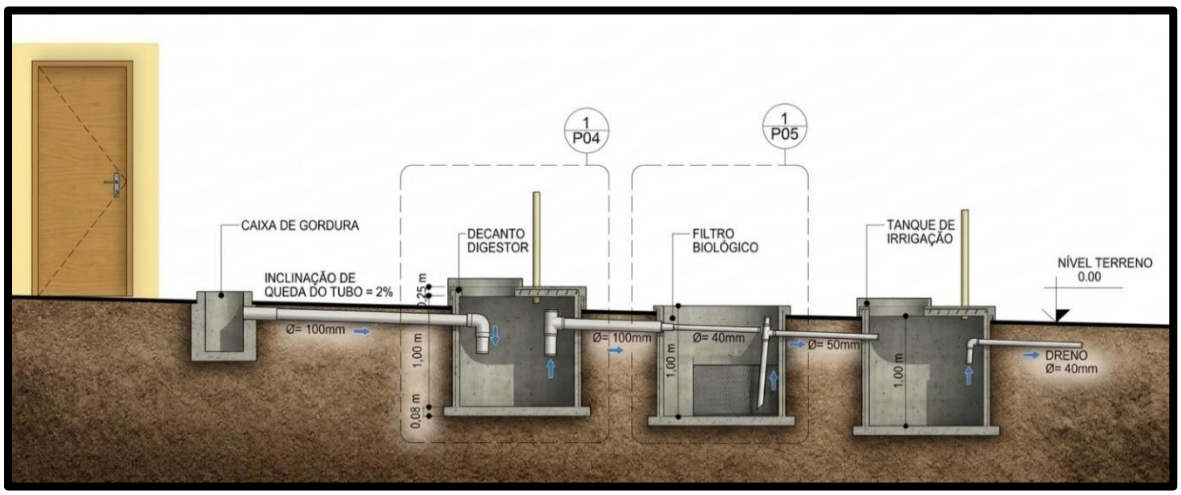
Em regiões semiáridas, como o nordeste brasileiro, a escassez hídrica impõe sérios desafios à agricultura familiar, que depende diretamente da disponibilidade de água para a produção de alimentos e geração de renda. Nesse contexto, o reúso de águas cinzas surge como uma solução prática e de baixo custo, especialmente em quintais produtivos, onde há cultivo de hortaliças, plantas medicinais, frutíferas e criação de pequenos animais (Mendonça; Santos; Cavalcante,2019).

Além da economia de água potável, esses sistemas promovem o aproveitamento de nutrientes presentes nas águas cinzas, como fósforo, nitrogênio e potássio, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos. Quando bem manejados, contribuem para a diversificação da produção familiar, a melhoria da segurança alimentar, e a valorização do papel das mulheres no manejo dos quintais, uma vez que muitas vezes são responsáveis pelo uso e reaproveitamento da água doméstica (Santos; Silva, 2020).

Experiências desenvolvidas por organizações sociais e instituições públicas mostram que, com capacitação adequada e monitoramento, é possível garantir a eficiência e a segurança do uso de águas cinzas, evitando riscos à saúde humana e ao solo. Assim, o reúso doméstico das águas cinzas se consolida como uma estratégia de convivência com o semiárido, promovendo sustentabilidade e autonomia para as famílias agricultoras (ASA Brasil, 2017).

De acordo com o Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários (SEAPAC, 2024), o Sistema de Saneamento Rural e Reúso de Águas Cinzas é composto por um sistema de coleta das águas residuárias, constituído por tubulações e caixa de gordura, seguido por um tanque decanto-digestor, um filtro biológico, um tanque de irrigação e um sistema de bombeamento associado à irrigação por gotejamento (Figura 1).

Figura 1 -Sistema de Saneamento Rural e Reúso de Águas Cinzas da SEAPAC



Fonte: Adaptado do SEAPAC (2024).

3.6.2 Caixa de gordura

A caixa de gordura constitui a primeira etapa do tratamento, sendo responsável pela retenção de óleos, graxas e materiais flutantes provenientes principalmente das águas oriundas das pias de cozinha. Sua função é evitar obstruções nas tubulações e minimizar a interferência desses compostos nas etapas subsequentes de tratamento biológico, contribuindo para a eficiência operacional do sistema (ABNT, 2020; SEAPAC, 2024).

Conforme a SEAPAC (2024), a caixa de gordura deve ser instalada próxima às saídas das águas provenientes da pia da cozinha, do banheiro e das áreas de serviço e lavagem de roupas. Essas águas são coletadas por meio de tubulações e conduzidas por gravidade até o decanto-digestor. Recomenda-se que a unidade seja construída em plástico ou concreto, possua capacidade mínima de 19 litros e disponha de um cesto interno que facilite a remoção dos resíduos acumulados. Além disso, a limpeza do equipamento deve ser realizada semanalmente para garantir o adequado funcionamento do sistema (SEAPAC, 2024).

3.6.3 Decanto-digestor

Nos sistemas simplificados de tratamento de águas cinzas, comumente aplicados em contextos de agricultura familiar e uso doméstico descentralizado, o decanto-digestor desempenha uma função essencial. Ele atua como a primeira etapa do tratamento, promovendo a remoção de sólidos suspensos, a retenção de material orgânico grosseiro e o início do processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica. Esse processo contribui para a redução da carga poluente do efluente antes de sua passagem para unidades complementares de tratamento, como filtros biológicos e sistemas de irrigação (SEAPAC, 2024).

Segundo Jesus *et al.* (2021, p. 142), o decanto-digestor é responsável por reter sólidos mais pesados e iniciar o processo de decomposição da matéria orgânica por meio da atividade de microrganismos anaeróbios, permitindo uma pré-filtração eficiente que aumenta a vida útil e a eficiência dos demais componentes do sistema de reúso.

Além disso, o decanto-digestor contribui para a redução da turbidez e da carga orgânica presente nas águas cinzas, favorecendo o desempenho das etapas subsequentes de tratamento e reduzindo o risco de obstrução dos materiais filtrantes. Por apresentar concepção simples, baixo custo de implantação e facilidade de operação, essa tecnologia pode ser adaptada às condições das comunidades rurais do Semiárido, constituindo uma alternativa apropriada para sistemas descentralizados de saneamento e reúso de águas cinzas (SEAPAC, 2024).

3.6.4 Filtro biológico aeróbio descendente

O filtro biológico constitui uma das principais unidades de tratamento complementar nos sistemas de reúso de águas cinzas, sendo responsável pela remoção de sólidos remanescentes e pela redução da matéria orgânica presente no efluente após a etapa de decantação. Além de atuar como uma barreira física à passagem de partículas em suspensão, esse sistema favorece a atividade microbiológica responsável pela degradação de compostos orgânicos dissolvidos, contribuindo para a melhoria da qualidade da água destinada ao reúso agrícola (ABNT, 1997; Dombroski*et al*., 2013; Cavalcante Filho *et al*., 2017).

O processo de tratamento ocorre por meio da ação conjunta de mecanismos físicos e biológicos. As camadas filtrantes promovem a retenção de sólidos finos e materiais em suspensão, enquanto os microrganismos aderidos ao meio suporte formam uma biomassa capaz de degradar a matéria orgânica remanescente. Dessa forma, o filtro biológico complementa o tratamento iniciado no decanto-digestor, favorecendo a redução da turbidez, da carga orgânica e de microrganismos presentes nas águas cinzas (Dombroski*et al*., 2013; Cavalcante Filho *et al*., 2017; Neres, 2018).

Na configuração adotada pela tecnologia social de reúso de águas cinzas difundidas pelo SEAPAC, o filtro é constituído por sucessivas camadas de materiais filtrantes dispostas de forma a potencializar os processos de filtração e biodegradação. Sua estrutura é composta por uma camada inferior de tijolos de bloco e pedras médias, seguida por uma camada de brita fina, uma camada de carvão vegetal protegida por tela de nylon e, na superfície, uma camada de material orgânico, que pode ser formada por bagaço de serraria, fibra de coco, sabugo de milho ou bucha vegetal. O efluente é distribuído na parte superior do sistema e percola de forma descendente através das diferentes camadas filtrantes até alcançar a saída do filtro (SEAPAC, 2024).

A eficiência do tratamento está relacionada a fatores como a granulometria dos materiais filtrantes, o tempo de detenção hidráulica, a adequada distribuição do fluxo, a disponibilidade de oxigênio e a realização periódica de manutenção. Quando corretamente dimensionado e operado, o filtro biológico pode promover melhorias significativas na qualidade das águas cinzas tratadas, contribuindo para o atendimento dos requisitos mínimos de reúso agrícola em sistemas de pequena escala e fortalecendo a segurança hídrica e produtiva das famílias do Semiárido (Dombroski*et al*., 2013; Neres, 2018).

Nesse sentido, Souza *et al*. (2019) observaram que os filtros biológicos utilizados nos sistemas de reúso de águas cinzas do Programa Uma Terra e Duas Águas (P1+2), coordenado

pela Articulação Semiárido Brasileiro (ASA), apresentaram elevada eficiência na redução da turbidez, da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e de indicadores microbiológicos, favorecendo a utilização segura da água tratada em quintais produtivos.

3.6.5 Tanque de armazenamento

Após o tratamento, o efluente é encaminhado, por gravidade, para um tanque de irrigação de alvenaria, onde permanece temporariamente armazenado até sua utilização. Esse componente desempenha importante função no controle operacional do sistema, uma vez que permite o gerenciamento do volume de água disponível e a adequação do tempo e da frequência de irrigação às necessidades das culturas (SEAPAC, 2024).

A partir do tanque de irrigação, a água tratada pode ser conduzida ao sistema de irrigação por gotejamento por meio de um dreno, utilizando a gravidade, ou mediante o emprego de uma bomba de sucção. Para garantir o funcionamento adequado do sistema de irrigação, é fundamental que a água apresente características compatíveis com o uso por gotejamento. Nesse sentido, as etapas anteriores de tratamento devem ser executadas de maneira adequada, assegurando o fluxo contínuo da água desde os pontos de geração nas residências até o tanque de irrigação e evitando a ocorrência de obstruções nas tubulações e nos emissores (SEAPAC, 2024).

Além dos aspectos relacionados ao funcionamento hidráulico, é necessário monitorar a concentração de sais e sódio na água de reúso, considerando os possíveis efeitos da aplicação contínua sobre o solo e as culturas, especialmente o risco de salinização. Como medida de redução da concentração salina, o SEAPAC (2024) recomenda, quando possível, a diluição da água cinza tratada com água de boa qualidade, podendo ser utilizada uma proporção de 50% de água tratada e 50% de água limpa no tanque de irrigação. Essa prática contribui para reduzir a concentração de sais na água aplicada e, consequentemente, minimizar os riscos associados ao seu uso contínuo na irrigação.

3.6.6 Sistema de Irrigação por Gotejamento

A SEAPAC (2024) recomenda a utilização da irrigação por gotejamento como estratégia para reduzir os potenciais efeitos adversos associados ao reúso de águas cinzas. A aplicação final da água tratada ocorre por meio de irrigação localizada por gotejamento, método que possibilita maior eficiência no uso da água, uma vez que direciona o efluente diretamente à

região radicular das plantas e reduz as perdas por evaporação. Do ponto de vista sanitário, esse sistema também apresenta vantagens para o reúso agrícola, pois minimiza o contato direto da água tratada com os agricultores e com a parte aérea e comestível das culturas, contribuindo para maior segurança na produção agrícola (SEAPAC, 2024).

A água tratada é destinada, principalmente, à produção de alimentos e forragens, por meio da irrigação localizada, contribuindo para ampliar a disponibilidade hídrica para as famílias agricultoras. Dessa forma, a tecnologia de tratamento e reúso de águas cinzas apresenta potencial para contribuir com o saneamento rural, a segurança hídrica e a produção agroecológica em comunidades do Semiárido brasileiro (SEAPAC, 2024).

3.7 Qualidade de água, dinâmica do solo e monitoramento no reúso

A qualidade das águas cinzas tratadas destinadas à irrigação é influenciada pela fonte de abastecimento e pelas atividades domésticas que originam o efluente, sendo necessário o monitoramento de parâmetros físico-químicos e microbiológicos para garantir a segurança e a sustentabilidade do reúso (Cunha, 2018; Araujo, 2025). Provenientes principalmente de chuveiros, pias e máquinas de lavar, essas águas apresentam potencial para ampliar a disponibilidade hídrica na agricultura familiar do Semiárido brasileiro. Entretanto, sua aplicação contínua no solo pode promover alterações em suas características físicas, químicas e biológicas, tornando necessário o acompanhamento da qualidade da água e do solo (FAO, 2010).

Entre os possíveis efeitos positivos do reúso destaca-se o aporte de matéria orgânica e nutrientes, como fósforo e potássio, que podem contribuir para a fertilidade do solo e reduzir a necessidade de insumos externos (Souza *et al*., 2020; Santana *et al*., 2020). Por outro lado, a aplicação contínua e sem controle pode favorecer o acúmulo de sais, alterações de pH e degradação da estrutura do solo. A presença de detergentes e surfactantes também merece atenção, uma vez que esses compostos podem interferir nas propriedades dos agregados, na infiltração e na retenção de água (Santos *et al*., 2019).

Melo *et al*. (2020) observaram que, em períodos curtos de irrigação suplementar com águas cinzas, as alterações nas características químicas do solo podem ser pouco expressivas; contudo, os autores ressaltam a importância do monitoramento de longo prazo devido à possibilidade de acúmulo de determinados elementos.

Dentre os parâmetros de qualidade da água, destacam-se o pH, a condutividade elétrica (CE), o sódio (Na^+), o cálcio (Ca^{2+}), o magnésio (Mg^{2+}), os cloretos (Cl^-), os bicarbonatos

(HCO_3^-) e a Razão de Adsorção de Sódio (RAS), além dos indicadores microbiológicos, como Escherichia coli e coliformes termo tolerantes, quando aplicáveis ao uso pretendido (Cunha, 2018; Melo *et al*., 2020; Araújo, 2025). A CE é particularmente importante por indicar a concentração de sais solúveis presentes na água, enquanto a concentração de sódio e a RAS auxiliam na avaliação do risco de sodificação. O pH, por sua vez, influencia a disponibilidade de nutrientes e as condições químicas do sistema solo-água (Melo *et al*., 2020; Araújo, 2025).

No solo, o acompanhamento de parâmetros como pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, nutrientes, densidade, porosidade, textura e Percentual de Sódio Trocável (PST) permite identificar alterações decorrentes da aplicação da água de reúso e avaliar sua capacidade de infiltração, retenção de água e manutenção da estrutura (Medeiros *et al*., 2018; Santos *et al*., 2019). Nesse contexto, os processos de salinização e sodificação constituem importantes riscos associados ao uso contínuo de águas residuárias.

O acúmulo de sais na zona radicular pode aumentar a salinidade do solo e dificultar a absorção de água pelas plantas, enquanto concentrações elevadas de sódio em relação ao cálcio e ao magnésio podem favorecer a dispersão das argilas, reduzindo a permeabilidade e a condutividade hidráulica (Ayers; Westcot, 1999; Cunha, 2018; Araujo, 2025). Esses riscos podem ser intensificados no Semiárido em razão da elevada evapotranspiração e do déficit hídrico, que favorecem a concentração de sais no perfil do solo (Araujo, 2025).

Dessa forma, o tratamento prévio das águas cinzas constitui uma etapa importante para reduzir a carga de contaminantes antes de sua aplicação, mas não substitui o monitoramento periódico da qualidade da água e do solo (Mota *et al*., 2021). A frequência de aplicação, a composição do efluente, as características do solo e as condições climáticas devem ser consideradas conjuntamente para avaliar a sustentabilidade do reúso (Medeiros *et al*., 2018). Em quintais produtivos do Semiárido, esse acompanhamento possibilita identificar precocemente alterações relacionadas à salinidade, sodicidade e disponibilidade de nutrientes, contribuindo para o manejo adequado da irrigação e para a conservação da qualidade do solo (Souza *et al*., 2020).

3.8 Desafios, Oportunidades e Políticas Públicas para o reúso

A escassez hídrica constitui um dos principais obstáculos à segurança alimentar e ao desenvolvimento da agricultura familiar no Semiárido brasileiro. Nesse contexto, o reúso de águas cinzas apresenta-se como alternativa para ampliar a disponibilidade hídrica destinada à produção de alimentos, plantas medicinais e forragens em comunidades rurais (Santos *et al*.,

2019). Apesar desse potencial, a adoção da prática ainda enfrenta desafios técnicos, sociais e institucionais, relacionados à operação e manutenção dos sistemas, à capacitação dos usuários, à aceitação da tecnologia e à disponibilidade de assistência técnica.

Entre os desafios técnicos, destacam-se a necessidade de manutenção periódica dos sistemas, o acompanhamento das condições de operação e a adequação das tecnologias às características das comunidades rurais. A variação da composição das águas cinzas, associada aos hábitos domésticos e às condições locais de abastecimento, exige sistemas de tratamento compatíveis com a realidade dos usuários (Cunha, 2018; Araújo, 2025).

Além disso, a ausência de conhecimento técnico pode comprometer a eficiência e a continuidade dos sistemas, tornando a capacitação das famílias um elemento fundamental para sua manutenção (Mota *et al*., 2021). Do ponto de vista social, a aceitação do reúso pode ser limitada pela percepção negativa associada ao uso de efluentes domésticos. A confiança nas tecnologias, o acesso à informação e a participação dos agricultores nas diferentes etapas de implantação favorecem a apropriação e a continuidade das iniciativas (Cunha, 2018; Araújo, 2025).

No âmbito das políticas públicas, destaca-se a mudança da perspectiva de "combate à seca" para a de convivência com o Semiárido, baseada na valorização das potencialidades locais e na adoção de tecnologias sociais descentralizadas (Galvão; Alcântara, 2015; Barbosa; Hernández, 2025). Nesse contexto, a atuação da Articulação Semiárido Brasileiro (ASA) e programas como o Programa Uma Terra e Duas Águas (P1+2) contribuem para ampliar o acesso à água destinada à produção e fortalecer estratégias de segurança hídrica e alimentar das famílias agricultoras (ASA, 2017). Essas experiências demonstram a importância de políticas que articulem acesso à água, produção agrícola, participação comunitária e fortalecimento da agricultura familiar.

As oportunidades associadas ao reúso estão relacionadas principalmente à utilização de um recurso que seria descartado, à ampliação da disponibilidade hídrica e ao fortalecimento dos quintais produtivos. Quando adequadamente manejadas, as águas cinzas podem contribuir para a produção agrícola e para a autonomia hídrica das famílias, especialmente em períodos de baixa disponibilidade de água (Santiago *et al*., 2012; Santana *et al*., 2020). Experiências desenvolvidas no Semiárido por instituições como a Embrapa Semiárido também evidenciam o potencial de tecnologias de reúso, como o Bioágua Familiar, para integrar saneamento rural e produção de alimentos, reforçando a perspectiva de aproveitamento de recursos dentro de sistemas produtivos.

A extensão rural e a assistência técnica são fundamentais para transformar essas oportunidades em práticas permanentes. A capacitação dos agricultores deve contemplar a operação e manutenção dos sistemas, o manejo adequado da água e a escolha das culturas, além de valorizar os conhecimentos e experiências das próprias comunidades (Ferreira *et al*., 2015; ASA, 2017). Nesse sentido, iniciativas participativas desenvolvidas pela ASA, pelo SEAPAC e por instituições de pesquisa e extensão contribuem para aproximar o conhecimento técnico dos saberes locais, favorecendo a autonomia dos usuários e a continuidade das tecnologias sociais (Araújo, 2025).

Quanto à aplicabilidade, tecnologias descentralizadas de reúso apresentam potencial para comunidades rurais do Semiárido por possibilitarem soluções adaptadas às condições locais, com operação relativamente simples e possibilidade de utilização de materiais acessíveis (Santiago *et al*., 2012; Mayer *et al*., 2020).

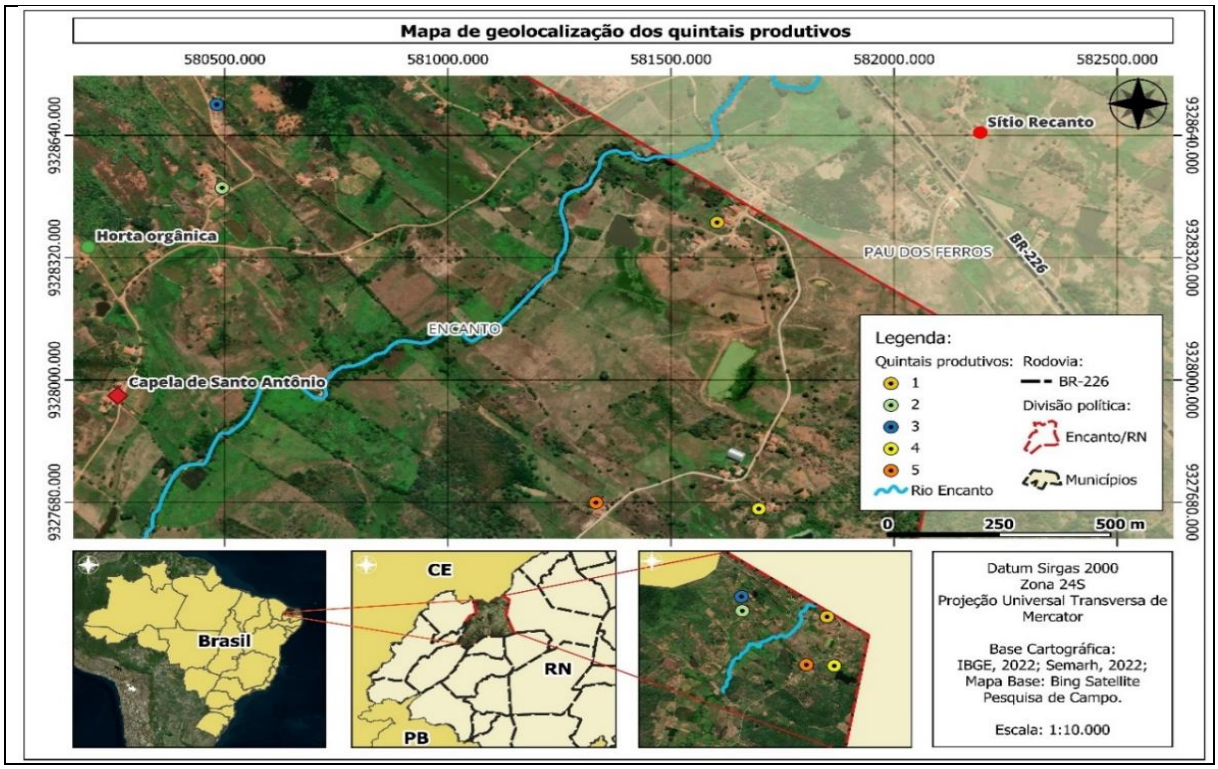
Entretanto, sua implantação não deve ser compreendida apenas como uma solução tecnológica, mas como parte de uma estratégia integrada de saneamento rural, segurança hídrica e produção agrícola. Assim, a consolidação do reúso de águas cinzas depende da articulação entre políticas públicas, pesquisa, extensão rural, participação comunitária e tecnologias adequadas às condições socioeconômicas e ambientais do Semiárido (ASA, 2017; Barbosa; Hernández, 2025).

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na comunidade rural de Conceição, localizada na zona rural do município de Encanto, no Estado do Rio Grande do Norte, sendo monitorados cinco quintais produtivos de agricultores familiares que possuem sistemas de tratamento e reúso de águas cinzas já implantados (Figura 1).Os sistemas apresentavam configurações de tratamento semelhantes, com geração de águas cinzas provenientes principalmente das atividades domésticas e utilização do efluente tratado para irrigação dos quintais produtivos. As unidades também apresentavam condições de manejo comparáveis, especialmente quanto à forma de aplicação da água tratada e ao uso da irrigação por gotejamento.

Figura 2 - Localização dos pontos de coleta de águas cinzas – Comunidade da Conceição Zona Rural do Encanto/RN



Fonte: Adaptado do Google Earth (2025).

O município de Encanto possui área territorial aproximada de 125 km^2 e população estimada em 5.212 habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). A economia local apresenta forte relação com a agricultura familiar e com atividades produtivas de pequena escala (IBGE, 2022), o que torna o reúso de águas cinzas uma

alternativa relevante para o fortalecimento da segurança hídrica, da produção de alimentos e da sustentabilidade ambiental nas propriedades rurais.

A comunidade de Conceição integra a microrregião do Alto Oeste Potiguar, região caracterizada pela predominância do clima semiárido, elevada irregularidade pluviométrica e frequentes períodos de estiagem, fatores que intensificam a vulnerabilidade hídrica e reforçam a necessidade de estratégias sustentáveis de convivência com a escassez de água (ANA, 2025).

Os pontos de coleta de águas cinzas e de solo foram georreferenciados por GPS, sendo as localizações dos quintais produtivos descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Localização dos quintais e sistemas de reúso

Quintal	Latitude (S)	Longitude (O)
Ponto 1	06º04’31,20”	38º15’45,20”
Ponto 2	06º04’28,30”	38º16’17,90”
Ponto 3	06º04’21,20”	38º16’21,70”
Ponto 4	06º04’55,60”	38º15’42,30”
Ponto 5	06º04’55,10”	38º15’54,00”

Fonte: Autoria própria (2026).

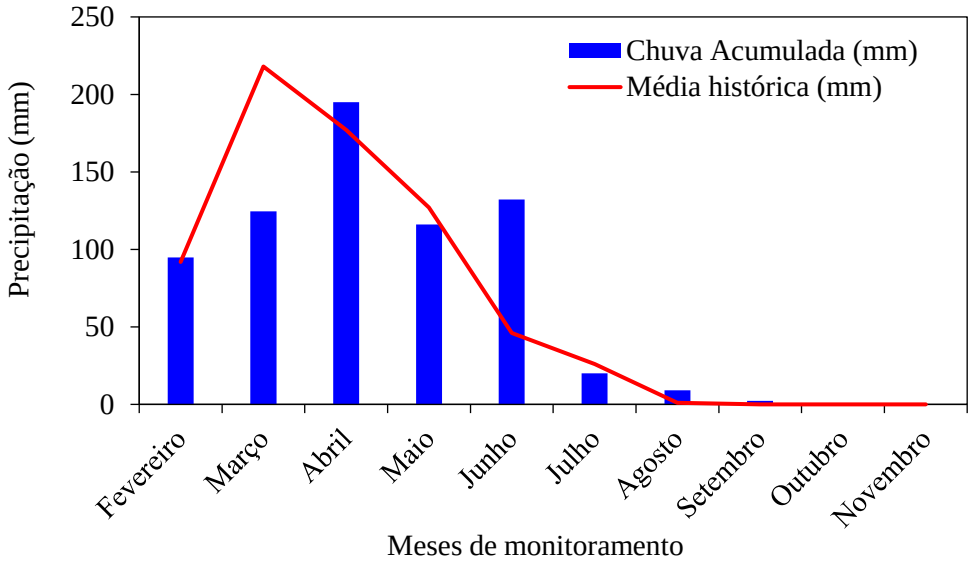
Cada quintal corresponde a uma residência de agricultura familiar da comunidade, todos situados na mesma microbacia hidrográfica, com características edafoclimáticas semelhantes, por se tratar de unidades de produção familiar vizinhas.

4.2 Características edafoclimáticas da área de estudo

A área de estudo está inserida no semiárido do Alto Oeste Potiguar, região que apresenta clima predominantemente do tipo semiárido quente (BSh), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (IDEMA, 2020). Esse tipo climático é caracterizado por elevadas temperaturas ao longo de todo o ano, alta taxa de evapotranspiração potencial, baixa umidade relativa do ar e forte irregularidade na distribuição espacial e temporal das chuvas, fatores que influenciam diretamente a disponibilidade hídrica e a dinâmica produtiva das comunidades rurais (IDEMA, 2020; ANA, 2025).

A Figura 2 apresenta um quadro com pluviometria observada no intervalo de estudo, no ano de 2025, na cidade do Encanto/ RN e a média histórica.

Figura 3 - Precipitação acumulada no ano de 2025 na cidade do Encanto/RN



Fonte: EMPARN (2025).

As temperaturas médias anuais situam-se em torno de 27 °C, com elevada incidência de radiação solar e precipitação média anual aproximada de 700 mm, concentrada principalmente entre os meses de fevereiro e maio, período que corresponde à estação chuvosa regional. O restante do ano é marcado por um prolongado período seco, que pode se estender por até oito meses, comprometendo o abastecimento hídrico, a produção agrícola e a manutenção dos sistemas produtivos familiares (Idema, 2020; Emparn, 2022).

O relevo da área de estudo é caracterizado, predominantemente como suave ondulado, com a presença de serras residuais, vales intermitentes, afloramentos rochosos e superfícies planadas, compondo a paisagem típica do domínio morfoclimático da Caatinga. Essa configuração influencia diretamente os processos de infiltração, escoamento superficial e armazenamento natural de água no solo, além de condicionar o uso e ocupação das terras para fins agrícolas (Ab'Sáber, 2003).

A vegetação predominante pertence ao bioma Caatinga, caracterizada por espécies xerófitas adaptadas às condições de déficit hídrico, com forte sazonalidade foliar, elevada resistência à seca e importante papel na proteção do solo contra processos erosivos. A degradação dessa cobertura vegetal, associada ao uso inadequado do solo e à pressão antrópica, contribui para a redução da fertilidade e o avanço da desertificação em áreas vulneráveis do semiárido nordestino (Brasil, 2021).

Em relação aos solos, predominam na região os Neossolos Litólicos e os Luvissolos Crômicos, geralmente rasos, pedregosos e com limitada profundidade efetiva. Os Neossolos apresentam baixa capacidade de retenção de água, elevada suscetibilidade à erosão e forte

restrição ao desenvolvimento radicular das culturas agrícolas. Já os Luvissolos, embora apresentem maior fertilidade natural e maior saturação por bases, podem apresentar problemas relacionados à sodicidade, compactação e susceptibilidade à salinização quando submetidos ao manejo inadequado da irrigação, especialmente com águas residuárias (Embrapa, 2018).

4.3 Disponibilidade hídrica nas comunidades

O abastecimento hídrico da comunidade ocorre por meio de diferentes fontes, incluindo a adutora comunitária, integrada ao sistema de abastecimento que utiliza o Açude Encanto como manancial**,** além de cisternas para captação de águas pluviais, poços tubulares e abastecimento complementar por carros-pipa, especialmente durante períodos de estiagem mais severa (ANA, 2025). Essas fontes são utilizadas principalmente para o consumo humano, a irrigação dos quintais produtivos e a dessedentação animal, contribuindo para a segurança hídrica das famílias rurais (ANA, 2025; ASA Brasil, 2021).

Entretanto, a irregularidade das chuvas, a limitação quantitativa e qualitativa dos mananciais subterrâneos e a crescente pressão sobre os recursos hídricos superficiais representam desafios persistentes à sustentabilidade local. Nesse cenário, estratégias complementares como o reúso de águas cinzas ganham relevância como instrumento de fortalecimento da resiliência hídrica, da produção de alimentos e da permanência das famílias no campo.

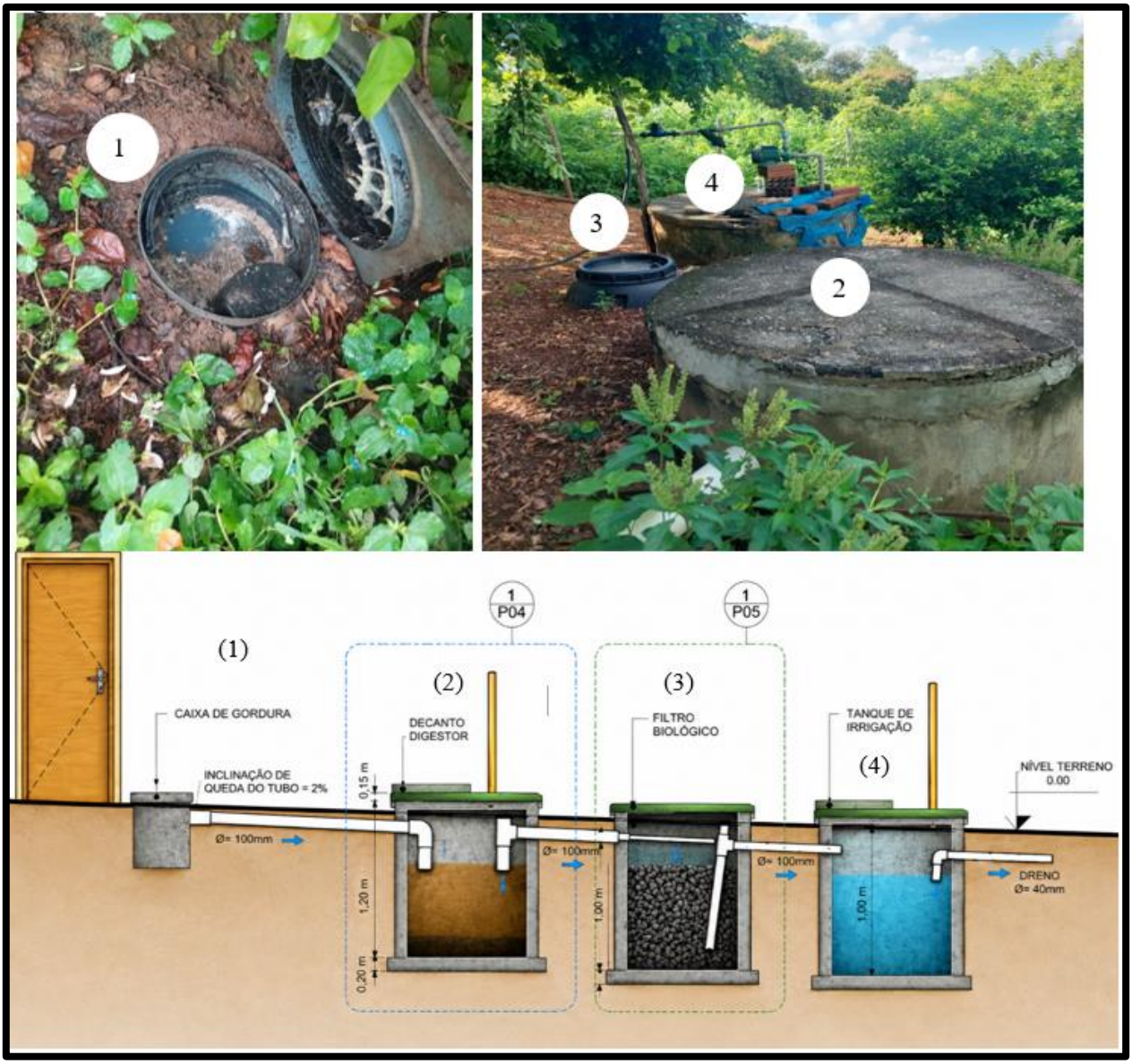
4.4 Sistema de tratamento e reúso

Todos os quintais produtivos avaliados apresentam o mesmo sistema de tratamento e reúso de águas cinzas, implantado no ano de 2020 por meio do Programa Semear, executado pelo SEAPAC (Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários). A padronização estrutural dos sistemas permite maior confiabilidade na comparação dos resultados obtidos entre as unidades monitoradas, reduzindo a influência de variáveis construtivas e operacionais sobre a qualidade do efluente tratado e sobre os impactos observados no solo.

O sistema foi projetado para promover o tratamento simplificado das águas cinzas domésticas provenientes principalmente de pias, chuveiros, lavanderias e demais usos não sanitários, visando seu posterior aproveitamento na irrigação de quintais produtivos da agricultura familiar (Figura 3). A estrutura é composta por etapas sucessivas de coleta, pré-

tratamento, tratamento biológico, armazenamento e distribuição da água tratada para irrigação localizada.

Figura 4 - Sistema de tratamento de águas cinzas



Fonte: Adaptado de SEAPAC (2022).

Nota: (1) Caixa de Gordura; (2) Decanto Digestor; (3) Filtro Biológico; e (4) Tanque de irrigação.

Inicialmente, ocorre a coleta das águas cinzas por meio de tubulações de esgoto em PVC de 100 mm de diâmetro, instaladas com declividade média de aproximadamente 2%, favorecendo o escoamento por gravidade e evitando o acúmulo de resíduos sólidos no interior das tubulações.

Na sequência, o efluente é direcionado para uma caixa de gordura em PVC, responsável pela retenção de óleos, graxas e materiais flutuantes que poderiam comprometer a eficiência

das etapas posteriores de tratamento. A unidade possui tampa externa com dimensões de 0,36 × 0,36 m, corpo interno circular com profundidade de 0,52 m, diâmetro de 0,40 m e volume aproximado de 0,065 m^3.

Após essa etapa, a água segue para o tanque decanto-digestor, construído com placas de cimento no formato cilíndrico (método semelhante ao das cisternas de placa), apresentando diâmetro interno de 1,14 m, altura de 1,00 m e paredes com espessura final de 8 cm. Esta unidade possui capacidade de 1.000 litros e exerce as funções de decantação, sedimentação e flotação de sólidos, além da digestão anaeróbia da matéria orgânica presente no efluente pela ação de microrganismos. Para garantir a eficiência do tratamento, a captação do efluente que segue para o pós-tratamento deve ocorrer a uma profundidade média de 2/3 da altura do tanque. O dimensionamento e a execução seguem o padrão da tecnologia social de saneamento rural desenvolvida pelo Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários (SEAPAC), integrada a princípios agroecológicos para a convivência com o semiárido (SEAPAC, 2024).

Posteriormente, o efluente passa por um filtro biológico, construído a partir de um tambor plástico com capacidade de 200 litros, instalado com aproximadamente 80% de seu volume enterrado e posicionado entre o decanto-digestor e o tanque de irrigação. Esse filtro atua como unidade complementar de tratamento físico-biológico, promovendo a retenção de partículas finas e o desenvolvimento de biofilme microbiano responsável pela degradação de matéria orgânica residual (SEAPAC, 2024).

O material filtrante é disposto em camadas sucessivas, iniciando com aproximadamente 15 tijolos cerâmicos, seguidos por brita fina, carvão vegetal e, na parte superior, uma camada de manta filtrante. Essa manta pode ser substituída por materiais alternativos de fácil acesso local, como fibra de coco, sabugo de milho, algodão ou raspas de madeira, tornando o sistema mais acessível e adaptável às condições socioeconômicas da agricultura familiar (SEAPAC, 2024).

Após o tratamento, a água é armazenada em um tanque de irrigação cilíndrico construído em alvenaria, com capacidade de 2,304 m^3, destinado ao reservatório temporário do efluente tratado antes de sua aplicação no sistema produtivo. Essa etapa permite maior controle operacional do volume disponível para irrigação e melhor gerenciamento do uso da água (SEAPAC, 2024).

Por fim, o sistema conta com uma unidade de bombeamento composta por bomba hidráulica com vazão aproximada de 0,18 $m^3\ h^{-1}$, responsável pelo envio da água tratada para o sistema de irrigação localizada por gotejamento, utilizando fitas gotejadoras distribuídas nos canteiros produtivos. Esse método de irrigação favorece maior eficiência no uso da água, reduz

perdas por evaporação e minimiza riscos de contato direto entre o efluente e a parte comestível das culturas, contribuindo para maior segurança sanitária e sustentabilidade do sistema produtivo (Seapac, 2024).

4.5 Monitoramento do sistema de tratamento e reúso

O desempenho dos sistemas de tratamento de águas cinzas foi monitorado durante dois períodos distintos do ano de 2025, com o objetivo de avaliar a influência da sazonalidade climática sobre a qualidade do efluente tratado e a dinâmica dos sais presentes no sistema. Foram considerados: (1) o período chuvoso, correspondente aos meses de abril (C1), maio (C2) e junho (C3), no primeiro semestre de 2025; e (2) o período seco, contemplando os meses de setembro (C4) e novembro (C5), no segundo semestre do mesmo ano.

O intervalo de dois meses entre as coletas de junho e setembro justifica-se pela necessidade de assegurar a consolidação das características típicas do período de estiagem severa, evitando-se a fase de transição climática. Sendo assim, foi possível permitir que os efeitos da redução do aporte hídrico e da elevada evapotranspiração sobre a concentração de sais e nutrientes no sistema fossem devidamente estabelecidos antes das análises do segundo semestre.

A análise teve como foco principal o comportamento dos sais dissolvidos e dos principais parâmetros físico-químicos relacionados ao potencial de uso agrícola das águas cinzas tratadas, especialmente quanto aos riscos de salinização e sodificação do solo. Para isso, as coletas foram realizadas em dois pontos distintos de cada sistema: na entrada e na saída do tratamento.

A coleta de entrada foi realizada diretamente na caixa de gordura, representando a água cinza bruta proveniente das atividades domésticas, como uso de pias, chuveiros, lavanderias e máquinas de lavar. Já a coleta de saída foi realizada após a passagem do efluente por todas as etapas do sistema de tratamento biológico, por meio da bomba de sucção utilizada no sistema de irrigação, representando a água cinza tratada efetivamente destinada ao reúso agrícola.

As amostras foram coletadas em cinco quintais produtivos monitorados. Entretanto, o Quintal 04 participou apenas das coletas realizadas no primeiro semestre, uma vez que, devido a problemas estruturais no sistema de tratamento, sua operação foi desativada em agosto de 2025. Nos demais quintais, o cronograma de monitoramento foi executado conforme o planejamento estabelecido. As amostras de entrada e saída foram acondicionadas em frascos plásticos esterilizados, devidamente identificados, e armazenadas em caixa térmica para

preservação de suas características físico-químicas até o encaminhamento aos laboratórios responsáveis pelas análises.

As análises laboratoriais foram realizadas, predominantemente, no Laboratório de Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Mossoró, sendo excepcionalmente a Coleta 04 processada no laboratório de análise de água do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN - Campus Apodi).

No laboratório da UFERSA foram determinados os seguintes parâmetros: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), cloretos (Cl^-), razão de adsorção de sódio (RAS), dureza total e demais cátions e ânions presentes no efluente. No IFRN, foram analisados pH, condutividade elétrica (CE), dureza, cloretos, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade, sólidos sedimentáveis e sódio (Na^+). A realização de análises coincidentes nos dois laboratórios teve como finalidade possibilitar a comparação dos resultados e contribuir para o controle da qualidade dos dados obtidos, enquanto os demais parâmetros foram determinados conforme a disponibilidade de métodos e infraestrutura analítica de cada instituição. Como controle comparativo, também foi monitorada a qualidade da água de abastecimento utilizada nas residências, permitindo comparar suas características com as das águas cinzas geradas e tratadas no sistema.

Para a organização e rastreabilidade das amostras, os frascos foram identificados com base em uma codificação padronizada, considerando: Q (número do quintal), C (número da coleta), E (entrada) e S (saída). Dessa forma, uma amostra identificada como Q2C3E corresponde ao Quintal 02, terceira coleta, ponto de entrada do sistema. Essa padronização permitiu maior controle analítico e melhor interpretação dos resultados ao longo do monitoramento.

4.6 Coleta e análise do solo

As amostras de solo coletadas foram acondicionadas individualmente em recipientes, devidamente identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró/RN, para a realização das análises físico-químicas. As amostras foram submetidas aos procedimentos de preparo e análise conforme os métodos descritos pela Embrapa (2018). Foram determinados os seguintes parâmetros: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), fósforo disponível (P), potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e percentual de sódio trocável (PST).

Para a avaliação dos efeitos edáficos decorrentes do reúso de águas cinzas nos sistemas produtivos, ao final de cada período de monitoramento (chuvoso e seco), foram coletadas amostras de solo em todos os quintais avaliados. As coletas foram realizadas na camada superficial de 0 a 20 cm de profundidade, em triplicata, utilizando trado manual, considerando-se essa faixa como a zona de maior interação entre a água de irrigação, o sistema radicular das culturas e os processos de acúmulo de sais e nutrientes.

Os dados obtidos foram analisados considerando os fatores operacionais dos sistemas de tratamento, a dinâmica de geração e reúso das águas cinzas, as possíveis alterações nas características químicas do solo e o atendimento aos parâmetros estabelecidos pela legislação e normas técnicas aplicáveis ao reúso agrícola de efluentes.

Por fim, foi realizada a caracterização produtiva dos quintais por meio de levantamento de campo junto aos agricultores familiares, permitindo obter informações sobre o funcionamento dos sistemas de reúso, as espécies cultivadas, o manejo da irrigação e a percepção dos produtores sobre os benefícios e limitações dessa prática.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização dos quintais

A caracterização dos quintais produtivos constitui etapa fundamental para compreender a organização, o funcionamento e a relevância desses sistemas no contexto da agricultura familiar no semiárido. As subseções a seguir apresentam essa caracterização em três eixos: a diversidade de cultivos, o desempenho hidráulico dos sistemas de irrigação e a destinação da produção obtida.

5.1.1 Diversidade de cultivos

O Quadro 3 apresenta a composição das culturas cultivadas nos cinco quintais produtivos participantes da pesquisa. Observa-se uma elevada diversidade de espécies frutíferas, hortaliças-fruto, como a pimenta, e plantas medicinais, com predominância de limão, acerola, goiaba, banana, manga e coco. Essa diversidade evidencia a adoção de sistemas produtivos multifuncionais, voltados principalmente para o autoconsumo das famílias e, em alguns casos, para a comercialização ou doação do excedente, contribuindo para a segurança alimentar e para o fortalecimento da agricultura familiar no semiárido.

Quadro 3 - Culturas cultivadas em cada quintal produtivo

Quintal	Culturas
1	Coco, acerola, limão, abacate, bananeira, amora e urucum.
2	Limão, graviola, acerola, laranja, tangerina, banana, caju, coco, goiaba, seriguela, manga, pimenta, palma e moringa.
3	Manga, acerola, limão, graviola, tamarindo, goiaba, palma e moringa.
4	Goiaba, limão, acerola, banana, graviola, amora, manga, pitaia, mamão, pimenta, medicinais, caju, tamarindo e laranja.
5	Coco, limão, medicinais, laranja, goiaba, acerola, banana, graviola e urucum.

Fonte: Autoria própria (2026).

Nos quintais avaliados, registrou-se a presença de até 14 espécies vegetais simultâneas, com predominância de frutíferas perenes (como *Citrus limon, Malpighiaemarginata* e *Cocos nucifera*), bem como de plantas medicinais e forrageiras (*Opuntiaficus-indica* e *Moringa oleifera*). Essa diversificação botânica se assemelha a resultados relatados em estudos sobre

quintais agroflorestais irrigados com águas cinzas tratadas no semiárido nordestino, a exemplo do trabalho de Souza e Oliveira (2023), nos quais a regularidade na oferta hídrica, quando integrada a arranjos agroflorestais, viabiliza a produção contínua de alimentos e reduz a sazonalidade imposta pela seca crônica. Tal integração mitiga a dependência de mercados externos para a aquisição de hortifrutis e prioriza a soberania alimentar imediata da unidade familiar (Ventura; Garcia; Andrade, 2019; Dias *et al.*, 2025)

Destaca-se que, com o aporte hídrico diário do efluente, os agricultores familiares conseguem manter espécies perenes de estratos diferentes, associando fruteiras, forragens e plantas medicinais, o que eleva a disponibilidade nutricional e reduz a dependência de insumos externos para a subsistência da propriedade (Souza; Oliveira, 2023; Dias*et al*., 2025). Essa configuração fortalece a função social dos quintais agroecológicos, priorizando a soberania alimentar imediata da unidade familiar e mitigando a necessidade de aquisição de hortifrutis em mercados externos (Ventura; Garcia; Andrade, 2019).

5.1.2 Desempenho hidráulico dos sistemas de irrigação

Os dados obtidos durante o monitoramento dos sistemas de reúso indicaram produção diária de água tratada variando entre 138 e 166 L d^{-1}. A disponibilidade hídrica apresentou reflexos diretos na área irrigada e na eficiência de uso da água, que variou de 0,26 a 0,74 L m^{-2} d^{-1}. O Quintal 3 apresentou a maior eficiência (0,74 L m^{-2} d^{-1}), enquanto o Quintal 5 registrou o menor valor (0,26 L m^{-2} d^{-1}), em razão da maior área irrigada em relação ao volume de água disponível (Tabela 8).

Tabela 8 - Caracterização dos quintais produtivos

Quintal	**Vazão (L/h)**	**Área (m^2)**	**Eficiência ($L/h/m^2$)**	**Nº de Culturas**	**Auto Consumo**	**Doação**
1	160	300	0,53	7	100%	0%
2	162	550	0,29	14	50%	50%
3	166	225	0,74	8	100%	0%
4	166	325	0,51	14	70%	30%
5	138	540	0,26	9	100%	0%

Fonte: Autoria própria (2025).

Considerando, para fins de planejamento, uma necessidade hídrica de referência de 7,0 L m^{-2} d^{-1} para irrigação de gramados no período de maior demanda hídrica (setembro a dezembro), verifica-se que os sistemas avaliados forneceram entre 3,7% e 10,6% dessa demanda. Embora esses volumes sejam insuficientes para atender integralmente culturas de elevada exigência hídrica, mostram-se relevantes para complementar a irrigação de quintais produtivos diversificados, compostos por espécies frutíferas, hortaliças e plantas medicinais adaptadas às condições do semiárido, contribuindo para a segurança alimentar das famílias e para o uso racional dos recursos hídricos.

Observa-se relativa uniformidade no regime hidráulico de escoamento do efluente tratado, fator que assegura o suprimento hídrico contínuo para áreas agrícolas familiares que variam de 225 a 550 m^2. A estabilidade na taxa de aplicação da água cinza nas respectivas áreas, mesmo sob regimes de baixa vazão, contribui para a manutenção da umidade do solo e para o desenvolvimento das culturas estabelecidas nos sistemas agroecológicos dos quintais produtivos. Embora os volumes aplicados não atendam integralmente às necessidades hídricas das culturas, constituem uma importante fonte complementar de água durante os períodos de estiagem, quando a disponibilidade hídrica representa um dos principais fatores limitantes à produção agrícola (Almeida, Silva e Moreira, 2024).

A distribuição espacial da taxa de aplicação de água variou de 0,26 a 0,74 L h^{-1} m^{-2} entre os quintais produtivos, evidenciando diferenças na distribuição do aporte hídrico em relação à área cultivada. O Quintal 3 apresentou a maior taxa de aplicação (0,74 L h^{-1} m^{-2}), concentrando o aporte hídrico em uma área de 225 m^2, enquanto o Quintal 5 apresentou a menor taxa (0,26 L h^{-1} m^{-2}), em uma superfície de 540 m^2. Essas diferenças na disponibilidade de água por unidade de área podem contribuir para explicar variações na composição e na manutenção da agrobiodiversidade dos quintais.

Entretanto, a aplicação de cargas hidráulicas elevadas em áreas reduzidas, como verificado no Quintal 3, pode acarretar problemas de degradação do solo a longo prazo. Segundo Almeida, Silva e Moreira (2024), o manejo inadequado e a falta de critérios técnicos na aplicação de águas cinzas podem favorecer a salinização do solo e a colmatação (entupimento) de seus poros devido ao aporte excessivo de sais e sólidos. Adicionalmente, a concentração de sódio presente nesses efluentes pode causar a dispersão de argilas, comprometendo a estrutura física e reduzindo a permeabilidade e a infiltração de água, o que torna o monitoramento constante essencial para a sustentabilidade da prática (Ayers; Westcot, 1999; FAO, 2010)

Nesse sentido, o reúso de efluentes na irrigação de culturas diversas tem sido amplamente reconhecida como uma estratégia sustentável de gestão hídrica, oferecendo múltiplos benefícios, embora também apresente alguns desafios (Christou*et al*., 2024; Hamidi, 2025). Uma de suas principais vantagens é a conservação dos recursos hídricos, reduzindo a dependência da água potável para irrigação.

5.1.3 Destinação da produção da agricultura familiar

Quanto à destinação da matéria agrícola produzida, observou-se que o autoconsumo foi o fator exclusivo nos quintais 1, 3 e 5 (100%), enquanto os quintais 2 e 4 apresentaram fluxos de comercialização local ou doação (50% e 30%, respectivamente, conforme Tabela 8). Essa configuração corrobora achados sobre a função social dos quintais agroecológicos, segundo os quais a integração hídrica viabilizada pelo tratamento de águas cinzas reduz a dependência crônica de mercados externos para a aquisição de hortifrutis, ao mesmo tempo em que gera excedentes que fortalecem as redes comunitárias de troca mútua e geram renda complementar indireta no semiárido (Ventura; Garcia; Andrade, 2019; Souza; Oliveira, 2023).

Essa diversificação botânica nos quintais assemelha-se aos resultados obtidos por Souza e Oliveira (2023) em Ouricuri, no semiárido de Pernambuco. Os autores constataram que a regularidade na oferta de águas cinzas tratadas, quando integrada a arranjos agroflorestais, viabiliza a produção contínua de alimentos e quebra a sazonalidade imposta pela seca crônica. Com o aporte hídrico diário do efluente, os agricultores familiares conseguem manter espécies perenes de estratos diferentes, associando fruteiras, forragens e plantas medicinais, o que eleva a disponibilidade nutricional e mitiga a dependência de insumos externos para a subsistência da propriedade.

Diferentemente de cenários de produção agrícola em maior escala, onde o efluente tratado costuma ser destinado a grandes cultivos comerciais e à otimização de trocas hídricas regionais (FAO, 2010), a aplicação localizada observada nos quintais produtivos do semiárido prioriza a segurança de subsistência e a soberania alimentar imediata da unidade familiar (Fernandes, 2023; Dias *et al*., 2025). Conforme ressaltado por Fernandes (2023), a democratização do acesso à água por meio dessas tecnologias sociais promove transformações profundas no meio rural, permitindo a diversificação produtiva e o incremento da qualidade de vida de famílias em situação de vulnerabilidade.

Essa configuração corrobora os achados de Ventura, Garcia e Andrade (2019) sobre a função social dos quintais agroecológicos, onde a integração hídrica viabilizada pelo tratamento

de águas cinzas mitiga a dependência crônica de mercados externos, ao mesmo tempo em que fortalece as redes comunitárias de troca e gera soberania alimentar por meio da produção de excedentes.

5.2 Desempenho do sistema de tratamento entre o período chuvoso e não chuvoso

O monitoramento das águas cinzas geradas nas residências de agricultura familiar permitiram diagnosticar o comportamento operacional dos sistemas descentralizados de tratamento sob duas condições meteorológicas distintas. Nesse contexto, a amostragem dividida entre os períodos chuvoso e seco evidenciou diferenças na dinâmica dos constituintes físico-químicos do esgoto doméstico, possivelmente relacionadas às variações no padrão de uso da água nas residências, que podem alterar as vazões geradas e, consequentemente, as concentrações dos poluentes no efluente, refletindo-se no desempenho das unidades avaliadas.

O Quadro 4 apresenta uma comparação geral dos parâmetros de qualidade da água nos períodos chuvoso e seco. De modo geral, observa-se maior variabilidade no período chuvoso e aumento de concentrações no período seco, especialmente para CE, dureza e cloretos. Já o pH tende à estabilização na saída, enquanto os STD indicam redução, evidenciando boa eficiência do tratamento.

Quadro 4 - Comparativo Geral

Parâmetro	**Período Chuvoso**	**Período Seco**	**Tendência Geral**
pH	Maior variabilidade	Mais estável	Estabilização na saída
CE	Moderada	Maior concentração	Aumento no seco
RAS	Variável	Redução em alguns sistemas	Risco moderado
Dureza	Elevada (Q3)	Muito elevada (Q3)	Persistência de sais
Cloretos	Diluição parcial	Concentração maior	Risco para culturas sensíveis
STD	Variável	Redução significativa na saída	Boa eficiência do tratamento

Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 9, 10 e 11apresentam o comportamento do potencial hidrogeniônico (pH) e da condutividade elétrica (CE) e sais obtidos no monitoramento dos pontos etapas afluente e

efluente ao sistema de tratamento composto por caixa de gordura, tanque digestor, filtro aeróbio descendente e reservatório, em cada quintal produtivo.

Tabela 9 - Resultados das análises de água nos períodos chuvoso e seco

Quintais	**Pontos de coleta**	**Parâmetros/Período**			
		Período Chuvoso		**Período Seco**	
		pH	**CE (dS m^{-1})**	**pH**	**CE (dS m^{-1})**
Q1E	Entrada	6,3 ± 0,6	0,9 ± 0,2	6,2 ± 0,1	1,0
Q1S	Saída	7,0 ± 0,3	1,0 ± 0,1	7,0 ± 0,0	1,2
Q2E	Entrada	5,8 ± 0,9	1,2 ± 0,2	6,8 ± 0,5	1,4
Q2S	Saída	7,3 ± 0,1	1,0 ± 0,8	7,2 ± 0,3	1,5
Q3E	Entrada	5,8 ± 0,9	2,0 ± 0,1	5,9 ± 0,9	2,2
Q3S	Saída	7,9 ± 0,4	2,2 ± 0,5	7,2 ± 0,3	2,3
Q4E	Entrada	7,5 ± 0,3	1,0 ± 0,3	-	-
Q4S	Saída	7,8 ± 0,3	1,4 ± 0,0	-	-
Q5E	Entrada	7,0 ± 0,3	1,0 ± 0,6	6,3 ± 0,6	1,3
Q5S	Saída	7,2 ± 0,3	1,0 ± 0,2	7,2 ± 0,2	1,3

Fonte**:** Autoria própria (2025).
Nota 1: Q - quintal; E - entrada; S -saída; pH - potencial hidrogênio; CE - condutividade elétrica.
Nota 2: Valores expressos como média ± desvio-padrão.

A ausência de desvio padrão para a CE no período não chuvoso (Tabela 9) deve-se ao desenho amostral desbalanceado entre as estações. Conforme detalhado nas limitações do estudo, o período seco contou com um número reduzido de amostragens válidas para este parâmetro específico, o que restringiu a análise estatística de variabilidade em comparação ao período chuvoso.

Dessa forma, para a CE no período não chuvoso, os dados foram tratados como indicadores de tendência sazonal dentro de uma caracterização complementar. Priorizou-se a apresentação dos valores médios absolutos, permitindo observar as variações da condutividade elétrica entre os pontos de entrada e saída do sistema de tratamento e entre os períodos avaliados. Essas variações podem estar relacionadas à composição iônica das águas cinzas e às transformações ocorridas durante o tratamento, não sendo atribuídas exclusivamente à evapotranspiração.

Tabela 10 - Resultado de análise dos parâmetros químicos de águas – Período chuvoso

Quintais	Pontos de coleta	Parâmetros						
		K^+ (mg L^{-1})	Na^+ (mg L^{-1})	Ca^{2+} (mg L^{-1})	Mg^{2+} (mg L^{-1})	Cl^- (mg L^{-1})	RAS	Dureza (mg L^{-1}de $CaCO_3$)
Q1E	Entrada	0,2± 0,2	4,3 ± 1,2	2,2 ± 0,4	2,6 ± 0,4	4,4 ± 0,5	2,8 ± 0,7	238,2 ± 38,4
Q1S	Saída	0,2 ± 0,2	4,6 ± 0,9	2,6 ± 0,6	2,7 ± 0,6	4,6 ± 0,4	2,8 ± 0,5	266,0 ± 59,9
Q2E	Entrada	0,5 ± 0,2	7,6 ± 0,9	2,6 ± 0,8	1,9 ± 0,9	5,9 ± 0,9	5,1 ± 0,2	225,8 ± 58,9
Q2S	Saída	0,3 ± 0,1	4,2 ± 2,4	3,3 ± 3,3	2,5 ± 2,0	4,4 ± 5,9	2,6 ± 0,5	293,2 ± 260,5
Q3E	Entrada	0,9 ± 0,2	7,1 ± 0,3	8,3 ± 1,0	6,1 ± 0,5	10,8 ± 2,9	2,6 ± 0,1	721,2 ± 26,9
Q3S	Saída	0,6 ± 0,3	8,0 ± 0,2	8,7 ± 2,8	5,5 ± 1,7	11,2 ± 2,5	3,0 ± 0,6	709,5 ± 222,9
Q4E	Entrada	0,1 ± 0,2	5,8 ± 2,7	3,1 ± 1,0	2,4 ± 0,4	2,8 ± 0,2	3,4 ± 1,3	274,2 ± 67,3
Q4S	Saída	0,3 ± 0,0	7,5 ± 0,3	4,0 ± 0,8	2,6 ± 0,9	4,2 ± 2,7	4,1 ± 0,1	331,5 ± 13,3
Q5E	Entrada	0,4 ± 0,2	5,8 ± 2,5	2,1 ± 0,7	2,3 ± 0,6	4,7 ± 3,3	3,8 ± 1,3	220,0 ± 6
Q5S	Saída	0,5 ± 0,1	5,1 ± 0,8	2,4 ± 0,1	2,0 ± 0,1	4,1 ± 0,7	3,3 ± 0,5	220,3 ± 14,1

Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: Q -quintal, E - entrada, S -saída,K+ - potássio, Na^+- sódio, Ca^{2+} -cálcio, Mg^{2+} - magnésio, Cl^--cloro, RAS - razão de adsorção de sódio.

Tabela 11- Resultado de análise dos parâmetros químicos de águas - Período não chuvoso

Quintais	Pontos de coleta	Parâmetros						
		K^+ (mg L^{-1})	Na^+ (mg L^{-1})	Ca^{2+} (mg L^{-1})	Mg^{2+} (mg L^{-1})	Cl^- (mg L^{-1})	RAS	Dureza (mg L^{-1}de $CaCO_3$)
Q1E	Entrada	0,35	5,62	1,07	2,89	5,60	4,00	198,00
Q1S	Saída	0,40	6,52	3,23	2,71	6,40	3,80	297,00
Q2E	Entrada	0,35	7,69	2,04	2,22	6,80	5,30	213,00
Q2S	Saída	0,35	5,10	5,22	4,99	9,00	2,30	510,50
Q3E	Entrada	1,40	6,70	8,50	7,21	15,00	2,40	785,50
Q3S	Saída	0,61	7,35	9,14	7,34	15,00	2,60	824,00
Q4E	Entrada	-	-	-	-	-	-	-
Q4S	Saída	-	-	-	-	-	-	-
Q5E	Entrada	0,79	5,36	2,35	2,11	5,40	3,60	223,00
Q5S	Saída	0,43	6,96	3,41	1,96	7,00	4,20	268,50

Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: Q - quintal, E - entrada, S - saída, K^+ - potássio, Na^+ - sódio, Ca^{2+} – cálcio, Mg^{2+} -magnésio, Cl^-- cloro, RAS razão de adsorção de sódio.

5.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE)

Os valores médios de pH obtidos no afluente bruto durante a estação chuvosa variaram entre 5,8 nos quintais Q2 e Q3 e 7,54 no Q4 (Tabela 9). Após a passagem pelo meio filtrante, verificou-se uma elevação dos valores do pH em todas as unidades operacionais, cujas médias efluentes se situaram na faixa de 7,0a 7,8, indicando um claro efeito de neutralização química. Esse comportamento repetiu-se no período seco, no qual o pH afluente variou de 5,8 a 6,8, alcançando estabilização efluente entre7,0 e 7,2.

Essa elevação observada na saída dos filtros pode estar associada às transformações biológicas e às alterações no equilíbrio ácido-base durante a passagem do efluente pelo filtro biológico, ao longo do escoamento hidráulico descendente (Metcalf e Eddy, 2016). Quanto aos requerimentos para reúso agrícola, os níveis de pH devem idealmente variar entre 6,5 e 8,4 para garantir a disponibilidade ideal de nutrientes e a atividade microbiana no solo (Li *et al*., 2025). Tal condição está de acordo com os critérios não restritivos estabelecidos pela FAO, prevenindo desequilíbrios nutricionais no solo ou com solubilização excessiva de metais fitotóxicos (Ayers e Westcot, 1999).

De forma geral, observou-se uma tendência de neutralização do pH na saída dos sistemas avaliados. Rojas et al. (2020), Butt *et al.* (2025) e Bahreini *et al*. (2026) corroboram esse resultado, indicando que, em sistemas de tratamento, é comum a estabilização do pH em faixas mais próximas da neutralidade, o que favorece a qualidade do efluente e sua adequação para fins de reuso. Esses achados reforçam a eficiência dos processos de tratamento na mitigação de variações extremas de acidez ou alcalinidade, contribuindo para a estabilidade química do efluente final.

A análise da condutividade elétrica expôs o efeito direto da sazonalidade regional sobre a salinidade do efluente. No período chuvoso, a CE variou de 0,85 a 2,02dSm^{-1} na entrada, com o quintal Q3 apresentando os maiores índices em ambas as etapas operacionais (Tabela 9). Durante o período não chuvoso, a ausência de precipitações intensificou a concentração dos esgotos brutos por redução do consumo per capita de água e menor aporte externo, elevando as médias afluentes de CE em todas as propriedades investigadas, com destaque novamente para o ponto Q3, que atingiu 2,24dS m^{-1} na entrada e 2,33dS m^{-1} na saída do sistema de tratamento.

O acréscimo pontual nos valores de CE observado na saída de alguns sistemas rurais, como verificado nos quintais Q1, Q2, Q3 e Q4 durante o período chuvoso, não está associado a perdas evaporativas internas significativas no leito filtrante. Esse fenômeno é explicado pela mineralização da matéria orgânica retida nas camadas de areia e brita, processo que quebra

compostos carbonados complexos e libera íons livres para a fase líquida, além da eventual lixiviação de sais previamente acumulados no próprio biofilme do filtro.

Os aumentos de CE observados no efluente dos sistemas Q1S, Q3S e Q4S podem estar associados as limitações que os sistemas biológicos e físicos apresentam em reter sais (Awasthiet*et al*., 2024). Além disso, esse comportamento pode ser intensificado em função da mineralização da matéria orgânica e a saturação de sistemas de tratamento com filtros saturados (Oteng-Peprahet*et al*.,2018). Destaca-se que esse acúmulo salino pós-tratamento exige monitoramento rigoroso, pois níveis elevados de CE e da razão de adsorção de sódio (RAS) quando aplicados em áreas de reúso agrícola podem induzir estresse osmótico e comprometer a absorção de nutrientes por culturas mais sensíveis (Li *et al*., 2025).

De acordo com as diretrizes de qualidade da água para irrigação da FAO (Ayers e Westcot, 1999), os valores de condutividade elétrica (CE) observados na saída dos sistemas situam-se, em geral, entre 0,7 e 3,0 dSm^{-1}, o que indica restrição de uso moderada para fins agrícolas. Nesse contexto, torna-se necessário o monitoramento contínuo da CE do extrato de saturação do solo nos quintais produtivos, aliado à adoção de práticas de manejo como frações de lixiviação controlada, melhoria da drenagem e seleção de culturas com tolerância moderada à salinidade, de modo a preservar a estrutura física do solo em condições semiáridas.

Do ponto de vista agronômico, os resultados evidenciam que as águas tratadas apresentam, em sua maioria, risco salino moderado e risco de sodicidade variável, o que demanda estratégias de manejo adequadas, como incorporação de matéria orgânica e acompanhamento periódico da qualidade do solo. Observa-se, ainda, que, no período seco, há comportamento químico mais crítico em comparação ao período chuvoso, especialmente no que se refere à concentração salina, o que pode ser explicado pela maior intensidade observada dos processos de evapotranspiração característico de regiões semiáridas (von Sperling, 2014).

Esses achados estão em consonância com a literatura, que indica que, embora os sistemas de tratamento de águas cinzas promovam melhorias significativas na qualidade do efluente, ainda podem resultar em limitações para irrigação. Rojas *et al.* (2020) destacam que a CE do efluente final pode se enquadrar em faixas de restrição “modesta a moderada” segundo a FAO, reforçando a classificação de risco intermediário. Além disso, estudos apontam que, apesar de a maioria dos parâmetros frequentemente atender aos padrões recomendados para irrigação, o monitoramento contínuo permanece essencial para garantir a segurança agronômica, tanto do ponto de vista químico quanto biológico.

5.2.2 Sódio (Na^+) e Relação de Adsorção de Sódio (RAS)

O monitoramento das concentrações deSódio (Na^+) e a avaliação da Razão de Adsorção de Sódio (RAS) evidenciou comportamentos distintos entre as propriedades rurais e os períodos sazonais (Tabelas 10 e 11). Durante a estação chuvosa, as concentrações afluentes de sódio foram mais expressivas nos quintais Q2 e Q3, registrando concentrações médias de 7,61e7,06 $mmol_c/L$, respectivamente. Após passagem pelo sistema compacto de tratamento, observou-se redução expressiva da concentração de sódio no quintal Q2, cuja média efluente atingiu4,17 $mmol_c/L$, refletindo-se na redução da RAS de 5,10 para 2,63. Esse comportamento também foi verificado no período seco, quando a RAS do Q2 decresceu de 5,30 para 2,30, indicando redução consistente do potencial de sodificação.

Por outro lado, os quintais Q3 e Q4 apresentaram acréscimos nas concentrações efluentes de sódio e nos índices de RAS durante o período de precipitações. Esse incremento pontual decorre possivelmente do arraste e desorção de sais acumulados na matriz orgânica do leito filtrante, além do aporte contínuo de insumos de lavagem doméstica ricos em surfactantes sódicos.Essa tendência pode ser atribuída ao acúmulo de surfactantes aniônicos, como o sulfato de sódio, amplamente utilizado em detergentes domésticos e responsável pelo aporte de Na^+ nas águas cinzas (Ramprasad; Philip, 2018). Além disso, o uso contínuo de sabões e agentes ionizantes em águas de lavanderia contribui para a manutenção das concentrações de sódio no efluente (Monsalves*et al*., 2023).

Sob a perspectiva do manejo da irrigação, os valores de RAS determinados na saída de todos os sistemas situaram-se abaixo de 9,00 durante os períodos chuvoso e seco, indicando baixo potencial de degradação da estrutura física do solo. Valores nessa faixa reduzem a probabilidade de dispersão de argilas, preservam a estabilidade dos agregados e favorecem a manutenção da condutividade hidráulica, aspectos essenciais para a infiltração da água e o desenvolvimento das culturas (Yalin*et al*., 2023). Além disso, sistemas domésticos de tratamento adequadamente manejados tendem a manter a salinidade e a sodicidade em níveis compatíveis com a irrigação agrícola (Nizeyimana, 2023).

De acordo com as diretrizes da FAO (Ayers e Westcot, 1999), os valores de RAS observados classificam a água tratada como de risco baixo a moderado quanto à sodificação do solo. Resultados semelhantes indicam a eficiência dos sistemas avaliados na redução desse risco, contribuindo para a viabilidade do uso agrícola da água tratada sem impactos significativos de salinização do solo (Butt*et al*., 2025). Entretanto, em áreas com predominância de solos argilosos expansivos, recomenda-se o monitoramento contínuo da RAS associado à

condutividade elétrica do extrato de saturação. Essa abordagem permite a adoção de práticas de manejo mais adequadas, capazes de minimizar a dispersão de partículas, a redução da permeabilidade do solo e possíveis impactos negativos sobre a produtividade agrícola em sistemas de reúso no semiárido.

5.2.3 Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Dureza total

Os teores de cálcio e magnésio ditaram os elevados índices de dureza total observados, com marcada centralização no quintal Q3. Esta unidade produtiva apresentou as maiores concentrações afluentes de cálcio (8,35$mmol_c$/L) e magnésio (6,07 $mmol_c$/L) durante o período chuvoso nos meses de março a maio de 2025, padrão que elevou a dureza média inicial para 721,17 mg/L e a manteve em 709,50 mg/L na saída (Tabela 10). Destaca-se que no período seco, o cenário de supersaturação iônica na água cinza no Q3 acentuou-se, culminando em uma dureza efluente de 824,0 mg/L (Tabela 11).

Esses níveis de concentração classificam o efluente tratado como uma água de dureza elevada. Embora essa característica não restrinja o desenvolvimento vegetal, ela representa um fator de risco severo para a infraestrutura do sistema irrigado. Conforme preconizado por Nakayama e Bucks (1986), águas com elevados teores de cálcio e magnésio expostas a variações térmicas e de pressão tendem a precipitar sob a forma de carbonato de cálcio, favorecendo incrustações químicas internas em tubulações e o entupimento progressivo de gotejadores e microaspersores.

5.2.4 Cloretos (Cl^-)

O balanço de cloretos acompanhou a assinatura iônica observada para a salinidade global. Durante o período chuvoso, o quintal Q3 concentrou os maiores valores de cloreto, registrando 11,20$mmol_c$/L na saída, enquanto as demais propriedades oscilaram em amplitudes inferiores a 5,0$mmol_c$/L.No período não chuvoso, observou-se uma redução nos equivalentes de cloreto efluente na maioria dos sistemas, sugerindo fenômenos pontuais de retenção por adsorção aniônica específica nas superfícies das frações orgânicas retidas no meio filtrante.

A persistência majoritária desses íons na fase líquida após o tratamento confirma a elevada mobilidade e a baixa eficiência dos processos biológicos e físicos em promovê-lo sua remoção. Esse comportamento está de acordo com Monsalves*et al*. (2023), que observaram eficiência de remoção de cloretos de apenas 12,37% em sistemas de wetlands, e com

Nizeyimana*et al*. (2023), que relatam elevadas concentrações desse íon em águas cinzas domésticas. Segundo Ramprasad e Philip (2018), a adsorção de cloretos no meio filtrante é um processo reversível, o que pode explicar o aumento observado no Q3 em função do arraste de sais previamente acumulados.

Dessa forma, a origem antrópica dos cloretos, associada principalmente ao uso de produtos de limpeza e higiene pessoal nas residências, exige atenção quanto ao seu potencial de toxicidade para espécies vegetais sensíveis cultivadas nos quintais produtivos. A persistência desses íons no efluente reforça a necessidade de monitoramento contínuo, uma vez que concentrações elevadas podem induzir estresse salino, reduzir o crescimento vegetativo e comprometer a produtividade das culturas (Yalin*et al*., 2023; Nizeyimana*et al*., 2023).

5.2.5 STD, SS e alcalinidade

Além dos parâmetros tradicionalmente utilizados para avaliação da qualidade do efluente, foram analisados os teores de cloretos, sólidos totais dissolvidos (STD), alcalinidade e sólidos sedimentáveis (SS), parâmetros que fornecem informações complementares sobre o potencial de salinização, a capacidade de tamponamento do efluente, associada principalmente à alcalinidade, e a presença de materiais particulados na água destinada ao reúso agrícola (Tabela 12). Os resultados obtidos no período não chuvoso evidenciaram diferenças entre os quintais e permitiram avaliar a eficiência dos sistemas de tratamento na remoção desses constituintes.

Tabela 12 - Resultado de análise de águas complementar- Período não chuvoso

Quintais	Parâmetros			
	Teor de Cloretos (%)	STD (%)	Alcalinidade (%)	SS (mL L^{-1})
Q1E	165	600	107,0	12,0
Q1S	90	240	52,0	3,0
Q2E	185	590	105,0	9,0
Q2S	40	110	17,0	0,01
Q3E	198	640	187,0	11,0
Q3S	105	310	82,0	2,0
Q4E	-	-	-	-
Q4S	-	-	-	-
Q5E	214	490	104,0	7,0
Q5S	110	302	12,0	1,0

Fonte: Autoria própria (2025).
Nota: Q -quintal, E-entrada, S -saída, STD -sólidos totais dissolvidos, SS-sólidos sedimentáveis.

Quanto aos sólidos totais dissolvidos (STD), observou-se redução das concentrações após o tratamento, passando de 600 para 240 mg L^{-1} no Q1, de 590 para 110 mg L^{-1} no Q2, de 640 para 310 mg L^{-1} no Q3 e de 490 para 302 mg L^{-1} no Q5. Essas reduções correspondem a eficiências de remoção de 60,0%, 81,4%, 51,6% e 38,4%, respectivamente, com remoção média de 57,8%. Os resultados evidenciam a eficiência dos sistemas na melhoria da qualidade do efluente para reúso agrícola. De forma semelhante, Butt*et al*. (2025) observaram redução média de 32,4% nos STD em sistemas de tratamento de águas cinzas, corroborando o potencial dessa tecnologia para uso na irrigação.

Entretanto, a redução dos SDT não foi acompanhada por diminuições proporcionais da condutividade elétrica em todos os sistemas. Tal comportamento pode estar associado a diferenças na composição iônica do efluente ou à variabilidade inerente aos métodos analíticos empregados, indicando a necessidade de monitoramento conjunto desses parâmetros para melhor compreensão da dinâmica dos sais dissolvidos. Resultados semelhantes foram observados por Rojas *et al.* (2020), que verificaram a manutenção ou até mesmo o aumento da condutividade elétrica após o tratamento. Da mesma forma, Craddock*et al*. (2020) relataram que, em condições de clima árido, a evapotranspiração pode concentrar os sais dissolvidos, elevando a condutividade elétrica do efluente final.

Em relação à alcalinidade, observou-se redução expressiva após o tratamento em todos os sistemas avaliados, com valores decrescendo de 107 para 52 mg L^{-1} no Q1, de 105 para 17

mg L^{-1} no Q2, de 187 para 82 mg L^{-1} no Q3 e de 104 para 12 mg L^{-1} no Q5. Resultados semelhantes foram reportados por Rojas *et al*. (2020), que observaram redução da alcalinidade de 106,06 para 76 mg L^{-1}, com maior queda ocorrendo na etapa inicial de filtração física, seguida de estabilização nos estágios subsequentes.

De acordo com Bahreini*et al*. (2026), durante o processo de tratamento pode ocorrer a deposição de sais inorgânicos, especialmente carbonatos, o que contribui para a formação de precipitados e favorece mecanismos de remoção desses compostos da fase líquida. Nesse contexto, os resultados obtidos indicam a eficiência dos sistemas na redução de substâncias responsáveis pela capacidade tampão da água, possivelmente associada à precipitação de carbonatos e ao consumo de bicarbonatos ao longo do tratamento.

No que se refere aos sólidos sedimentáveis, observou-se redução expressiva após o tratamento em todos os sistemas avaliados, com variações de 12,0 para 3,0 no Q1, de 9,0 para 0,01 no Q2, de 11,0 para 2,0 no Q3 e de 7,0 para 1,0 no Q5. Esses resultados indicam elevada eficiência na remoção de material particulado, o que é essencial para a prevenção de entupimentos em sistemas de irrigação localizada, além de contribuir para maior segurança operacional do reúso agrícola.

Bahreinei*et al*. (2026) e Rojas *et al*. (2020), destacam que processos físicos predominantes em sistemas de filtração em areia são fundamentais para a retenção de partículas suspensas, corroborando a elevada eficiência observada. Adicionalmente, Rojas et al. (2020) ressaltam que o desempenho pode ser ainda otimizado com a adoção de etapas complementares de filtração mecânica, capazes de reter partículas de maior granulometria antes das etapas de tratamento mais refinadas.

Diante disso, os resultados obtidos indicam um desempenho satisfatório do sistema na remoção de sólidos, alinhando-se ao que é reportado na literatura para tecnologias similares. Butt*et al*. (2025) reforçam a eficiência de sistemas biológicos na redução de cargas sólidas, enquanto Craddock*et al*. (2020) e Rojas *et al*. (2020) alertam que, em alguns sistemas, pode ocorrer aumento da concentração de sais ao longo do tratamento devido à evapotranspiração ou ao desgaste dos materiais filtrantes. Nesse contexto, o desempenho observado neste estudo se destaca como positivo, evidenciando a robustez dos sistemas avaliados e sua adequação ao reúso agrícola, especialmente quando associados a etapas de pré-filtração e manutenção periódica adequada.

Para o contexto da agricultura familiar no semiárido, o reúso é tecnicamente viável, desde que acompanhado de monitoramento periódico da qualidade da água, e eficiência do

sistema, manejo adequado do solo e técnicas sustentáveis de produção agroecológicas, como rotação de culturas, adubos orgânicos, defensivos naturais, dentro outros.

5.2.6 Enquadramento do efluente e atendimento à Resolução COEMA nº 02/2017

A avaliação da conformidade legal do efluente tratado constitui etapa essencial para verificar sua viabilidade de reúso agrícola, assegurando a proteção ambiental e sanitária. No contexto do Semiárido brasileiro, adotou-se como referência a Resolução COEMA nº 02, de 02 de fevereiro de 2017, que dispõe sobre padrões e condições para o reúso externo de efluentes no Estado do Ceará. Considerando as características do sistema Bioágua/SEAPAC e a finalidade de irrigação dos quintais produtivos, utilizou-se como referência a modalidade de reúso para fins agrícolas e florestais, prevista no art. 37, inciso II, da referida resolução.

Ao confrontar os resultados obtidos na saída do sistema modular com os limites da referida norma, estabelecidos pela Resolução COEMA nº 02/2017 demonstra que os parâmetros analisados atenderam aos padrões exigidos para reúso agrícola. Quanto ao Potencial Hidrogeniônico (pH), tem-se que a Resolução COEMA (2017) exige que o pH para fins agrícolas e florestais esteja entre 6,0 e 8,5. Os valores encontrados na saída do sistema variaram entre 6,95 e 7,84, demonstrando que o processo de tratamento biológico foi eficiente em neutralizar a acidez do efluente bruto, mantendo-o rigorosamente dentro dos limites legais.

Em relação à Condutividade Elétrica (CE), o limite máximo permitido pela norma é de 3,0 dS/m. Mesmo no período não chuvoso, onde a evapotranspiração acentuou a concentração de sais, o valor máximo registrado foi de 2,33 dSm^{-1} (Ponto Q3S). Portanto, embora o efluente apresente "restrição moderada" segundo os critérios da FAO, ele atende integralmente aos requisitos quantitativos da legislação estadual cearense.

No que diz respeito à Razão de Adsorção de Sódio (RAS), o art. 39 da referida resolução estabelece os padrões de qualidade para a modalidade definida no art. 37, fixando o limite de até 15 $(mmolc/L)^{0,5}$para a RAS em águas de reúso agrícola. Em todos os quintais monitorados, a RAS efluente permaneceu abaixo de 9,0, com médias de 2,30 a 4,20 no período seco. Sendo assim, o resultado assegura que o efluente possui baixo potencial de degradação da estrutura física do solo por sódio.

Quanto aos Sólidos Suspensos Totais (SST) e à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5), ambos exigidos pela Resolução COEMA nº 02/2017 para a modalidade de reúso agrícola e florestal, este estudo não realizou sua determinação direta. A caracterização complementar do período não chuvoso limitou-se aos Sólidos Sedimentáveis e aos Sólidos

Totais Dissolvidos (STD), que registraram remoção média de 57,8%. Além disso, embora essa redução indique desempenho satisfatório do sistema na remoção de material particulado e dissolvido, ela não permite inferir, por si só, o atendimento aos limites específicos de SST (100 mg/L) e DBO_5 (200 mg/L) estabelecidos pela norma. A ausência dessas determinações constitui uma limitação analítica deste trabalho, e sua inclusão em estudos futuros é necessária para completar o enquadramento legal do efluente.

De modo geral, os resultados demonstram que a água cinza tratada pelo Sistema de Saneamento Rural e Reúso de Águas Cinzas/SEAPAC atendeu aos limites estabelecidos pela Resolução COEMA nº 02/2017 para os parâmetros efetivamente avaliados neste estudo, pH, condutividade elétrica e Relação de Adsorção de Sódio (RAS), o que evidencia viabilidade técnica para o reúso agrícola em sistemas de pequena escala nesses três aspectos. O enquadramento legal completo do efluente, no entanto, permanece parcial: os parâmetros de Sólidos Suspensos Totais, Demanda Bioquímica de Oxigênio e indicadores microbiológicos (especialmente coliformes termotolerantes, exigidos pelo art. 39 da referida resolução para culturas consumidas cruas) não foram determinados neste monitoramento e devem ser tratados como lacuna a suprir antes de qualquer afirmação de conformidade integral com a norma. Assim, recomenda-se que o uso continuado do sistema seja acompanhado de monitoramento periódico que inclua esses parâmetros, além da adoção de práticas de manejo que minimizem riscos de degradação do solo ao longo do tempo.

5.3 Qualidade do solo em quintais produtivos com sistemas de reúso de águas cinzas

Faz-se necessário analisar a qualidade do solo em quintais produtivos pois o reúso de águas residuárias pode promover alterações na fertilidade química do substrato. Em agroecossistemas no Ceará, Barbosa (2019) identificou concentrações críticas de fósforo, superando 120 mg/dm³, o que demanda manejo cuidadoso para evitar desequilíbrios nutricionais. Para presente pesquisa, observou-se a comparação dos atributos químicos do solo entre os períodos chuvoso e não chuvoso, em que foi possível evidenciar a influência da sazonalidade sobre a dinâmica dos nutrientes e dos sais solúveis (Tabela 13).

Tabela 13 - Comparativo das análises de solo: Período chuvoso e não chuvoso

Período de coleta	pH	CE (dS m^{-1})	P (mg dm^{-3})	Na (cmolc dm^{-3})	SB (cmolc dm^{-3})	CTC (cmolc dm^{-3})	PST (%)
Chuvoso	7,5 ± 0,3	0,2 ± 0,1	4,3 ± 1,2	0,2 ± 0,8	10,9 ± 2,9	10,8 ± 3,0	2,0 ± 1,6
Não chuvoso	7,2 ± 0,4	0,6 ± 0,1	18,1 ± 6,6	0,1 ± 0,1	1,9 ± 0,6	1,9 ± 0,6	6,4 ± 2,2

Fonte**:** Autoria própria (2025).

Nota: pH - potencial hidrogeniônico; CE- condutividade elétrica; P- fósforo; Na^+ - sódio; SB -soma de bases; CTC -capacidade de troca catiônica; e PST- percentual de sódio trocável.

No período chuvoso, observou-se maior pH (7,5 ± 0,3), maior soma de bases (SB = 10,9 ± 2,9 cmolc dm^{-3}) e maior capacidade de troca catiônica (CTC = 10,8 ± 3,04 cmolc dm^{-3}), enquanto os teores de fósforo (4,3 ± 1,2 mg dm^{-3}), sódio (0,2 ± 0,17 cmolc dm^{-3}) e percentual de sódio trocável (PST = 2,0 ± 1,6%) permaneceram reduzidos.

Durante o período não chuvoso, verificou-se aumento expressivo dos teores de fósforo (18,1 ± 6,6 mg dm^{-3}), acompanhado pelo incremento da condutividade elétrica (0,6 ± 0,1 dSm^{-1}) e da soma de bases (1,9 ± 0,6 cmolc dm^{-3}). Além disso, no período não chuvoso, verificou-se uma redução nominal nos teores de sódio (média de 0,1 ± 0,1 cmolcdm^{-3}) em comparação ao chuvoso (0,2 ± 0,2 cmolcdm^{-3}). Contudo, conforme observado na Tabela 13, esse constituinte assumiu maior relevância proporcional no complexo de troca devido à queda acentuada da CTC (1,9 ± 0,6 cmolc dm^{-3}) no mesmo intervalo, o que justifica o incremento expressivo do Percentual de Sódio Trocável (PST = 6,4 ± 2,2%) de 2,0% para 6,4% durante a estiagem.

Os resultados evidenciam forte influência da sazonalidade na química do solo em sistemas irrigados com águas cinzas. No período chuvoso, observaram-se melhores condições de fertilidade, com maior SB e CTC e menor concentração de sais e sódio.

5.3.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

No período chuvoso, os valores de pH variaram entre 7,00 e 7,87, caracterizando solos de reação neutra a levemente alcalina. No período não chuvoso, os valores oscilaram entre 6,65 e 7,60, permanecendo predominantemente na faixa de neutralidade e indicando estabilidade química do solo ao longo do período de monitoramento.

A discreta redução do pH observada em alguns quintais durante o período seco pode estar relacionada à concentração de sais na solução do solo e à dinâmica das reações de troca catiônica, sem, contudo, alterar sua classificação quanto à reação. Segundo Novais *et al*. (2007),

solos com pH próximo da neutralidade apresentam maior disponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo, cálcio e magnésio, favorecendo o desenvolvimento vegetal e a atividade microbiológica, condição compatível com os valores observados neste estudo.

As variações sazonais refletem a influência do regime pluviométrico sobre a dinâmica dos nutrientes e dos sais no solo. Durante o período não chuvoso, a menor ocorrência de precipitações reduz os processos de lixiviação e, associada às elevadas taxas de evapotranspiração características do semiárido, favorece a concentração de íons e nutrientes provenientes da irrigação com efluente tratado (Barbosa, 2019; Illanes et al., 2026). Em contrapartida, no período chuvoso, o maior aporte hídrico promove o transporte vertical de sais e sua remoção das camadas superficiais, contribuindo para a manutenção do equilíbrio químico do solo e reduzindo o risco de acúmulo de sódio e de salinização, especialmente quando associado a condições adequadas de drenagem (Illanes *et al.*, 2026; Hamidi, 2025).

5.3.2 Condutividade elétrica (CE)

A condutividade elétrica (CE) apresentou aumento expressivo no período seco, variando de 0,10 a 0,35 dSm^{-1} no período chuvoso para 0,48 a 0,70 dSm^{-1} no período seco. Esse incremento indica acúmulo de sais solúveis no sistema solo-água, fenômeno típico de condições semiáridas, marcadas por menor precipitação e maior evapotranspiração. Conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017), em ambientes semiáridos a redução da lixiviação natural favorece a concentração de sais na zona superficial do solo, especialmente quando há uso de águas com maior carga salina.

De acordo com a classificação de solos salinos, valores de CE inferiores a 2 dS/m ainda indicam condições não salinas; no entanto, a tendência de elevação contínua pode representar risco de salinização progressiva, sobretudo em sistemas de irrigação contínua e baixa renovação hídrica.

Craddock*et al*. (2020) explicam que, em climas áridos, a elevada evapotranspiração intensifica a concentração de sais e contaminantes no sistema de reúso. De forma complementar, Maimon, Gilboa e Gross (2023) destacam que íons provenientes de produtos de limpeza, como Na^{+}, Cl^{-} e B, podem aumentar a salinidade das águas cinzas, sendo que processos de tratamento extensivo também podem favorecer essa concentração por perdas hídricas por evaporação. Além disso, Nyagatare, Shingiro e Nyiranziringirimana (2021) observaram que a aplicação de águas cinzas promove aumento significativo da CE do solo em

comparação ao uso de água de abastecimento, evidenciando o impacto cumulativo do reúso na salinidade do sistema solo-água.

5.3.3 Fósforo (P)

Os teores de fósforo apresentaram aumento expressivo no período não chuvoso, variando de 2,46 a 5,33 mg dm^{-3} no período chuvoso para 10,90 a 26,82 mg dm^{-3} no período seco. Esse comportamento pode ser explicado pela baixa mobilidade do fósforo no solo, associada à redução dos processos de lixiviação e ao aporte contínuo desse nutriente por meio das águas cinzas utilizadas na irrigação, que frequentemente contêm detergentes e resíduos orgânicos ricos em compostos fosfatados.

Além disso, as elevadas taxas de evapotranspiração características do semiárido favorecem a concentração de nutrientes na camada superficial do solo, potencializando seu acúmulo. Segundo a Food and Agriculture Organization (FAO, 2010), águas residuárias domésticas podem representar importante fonte de fósforo para as culturas, reduzindo a necessidade de fertilização mineral, embora seu uso contínuo exija monitoramento para evitar o enriquecimento excessivo do solo. Resultados semelhantes foram observados por Barbosa (2019) e Illanes *et al*. (2026), que atribuíram o incremento dos teores de fósforo à aplicação sucessiva de efluentes tratados e à elevada capacidade de retenção desse nutriente nas camadas superficiais do solo.

5.3.4 Potássio (K^+) e Sódio (Na^+)

Os teores de potássio no complexo de troca variaram de 0,25 a 0,82 $cmolcdm^{-3}$ no período chuvoso, e de 0,04 a 0,07 $cmolcdm^{-3}$ (valores convertidos de 17,40 a 27,90 $mgdm^{-3}$) no período seco. Observa-se uma redução nos teores de potássio trocável entre os períodos. Esse comportamento pode estar associado principalmente à absorção do nutriente pelas culturas cultivadas, embora processos de lixiviação ocorridos durante a estação chuvosa também possam ter contribuído para a diminuição observada.

Em relação ao sódio, embora os teores absolutos de Na^+ no complexo de troca não tenham apresentado aumento nominal em $cmolcdm^{-3}$, observa-se um impacto proporcional significativamente superior desse íon no período seco em comparação ao período chuvoso. No período chuvoso, os teores de Na^+ variaram de 0,05 a 0,42 $cmolcdm^{-3}$. Já no período seco, os valores médios registrados em laboratório (31,0 $mgdm^{-3}$) correspondem a aproximadamente

0,13±0,1cmolcdm^{-3} quando convertidos para a mesma unidade da Soma de Bases (SB). Essa manutenção de teores, mesmo com menor aporte hídrico, aliada à redução dos sítios de troca (CTC), confirma a tendência de acúmulo progressivo desse íon e o aumento do risco de sodificação sob condições de elevada evapotranspiração.

A aparente redução no valor absoluto de sódio é acompanhada por uma elevação crítica da Porcentagem de Sódio Trocável (PST), que saltou de uma faixa de 0,53 a 4,48% no período chuvoso para 3,90 a 8,82% no período seco. Esse fenômeno é explicado pela drástica redução da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo no período seco (que caiu de uma média de 10,8 para 1,9 cmolc dm^{-3}), fazendo com que o sódio passasse a ocupar uma proporção muito maior dos sítios de troca, indicando maior tendência à sodificação sob condições de menor disponibilidade hídrica.

Esse comportamento é corroborado pela literatura. Nyagatare, Shingiro e Nyiranziringirimana (2021) observaram aumento significativo do teor de sódio no solo associado ao reúso de águas cinzas, com valores superiores nos tratamentos com aplicação de água cinza pura (3,06 mg/kg) em comparação ao controle com água de abastecimento (0,99 mg/kg). De forma complementar, Misra, Patel e Baxi (2010) destacam que solos irrigados com águas cinzas tendem a reter sódio ao longo do tempo, favorecendo sua acumulação progressiva no perfil do solo.

Embora o valor de PST (6,4%) ainda esteja abaixo do limite clássico de 15% para classificação de solo sódico (Richards, 1954), a tendência de aumento ao longo do tempo indica risco potencial de sodificação, que compromete a estrutura do solo, reduzindo sua infiltração, permeabilidade e estabilidade agregada. Destaca-se, ainda, que esse efeito se intensifica pelas condições climáticas do semiárido: a elevada evapotranspiração promove a concentração de sais na solução do solo durante o período seco, potencializando os efeitos da sodificação (Travis *et al*., 2010; Craddock*et al*., 2020). Como consequência, o excesso de sódio reduz a condutividade hidráulica saturada, favorece o escoamento superficial (*runoff*) e compromete a capacidade do solo de infiltrar, armazenar e transmitir água às culturas (Radingoana; Dube; Mazvimavi, 2020).

5.3.5 Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Soma de Bases (SB)

No período chuvoso, os solos apresentaram teores de cálcio entre 6,58 e 12,86 cmolcdm^{-3}, e teores de magnésio entre 0,05 e 0,87 cmolcdm^{-3}. A Soma de Bases (SB), que resulta da

combinação desses e demais cátions, variou entre 7,72 e 14,53 $cmolcdm^{-3}$, com saturação por bases (V) igual a 100% para todos os pontos avaliados.

Já no período seco, o cálcio variou de 0,74 a 1,90 $cmolcdm^{-3}$ e o magnésio de 0,01 a 0,80 $cmolcdm^{-3}$, acompanhando a redução acentuada da SB, que ficou entre 1,19 e 2,67 $cmolcdm^{-3}$. Essa queda pode estar associada tanto ao possível deslocamento de Ca^{2+} e Mg^{2+}porNa^{+} no complexo de troca quanto à concentração diferencial de sais em função da menor umidade do solo.

Esse padrão de redução da SB e de substituição de cátions básicos por sódio também foi observado por Nyagatare, Shingiro e Nyiranziringirimana (2021), que relataram diminuição significativa das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo com o aumento da aplicação de águas cinzas. Ainda segundo os autores, esse comportamento ocorre devido à substituição iônica, na qual o Na^{+} presente na água cinza desloca Ca^{2+} e Mg^{2+} dos sítios de troca do solo, reduzindo sua disponibilidade na solução do solo e favorecendo sua possível translocação para camadas mais profundas.

Esse comportamento torna-se mais evidente em condições de baixa umidade, como no período seco, quando a menor lixiviação intensifica a concentração de sais no perfil do solo. Silva *et al*. (2023) reforçam que, em ambientes semiáridos, o uso de águas cinzas sem tratamento adequado altera significativamente as propriedades físico-químicas do solo, afetando o movimento da água e a dinâmica de retenção e acúmulo de sais, efeitos que se intensificam durante períodos de déficit hídrico.

Nesse contexto, embora a irrigação com águas cinzas possa contribuir com aporte de nutrientes, a predominância do sódio tende a desequilibrar a composição da Soma de Bases, elevando significativamente a Relação de Adsorção de Sódio (RAS) em relação às condições iniciais do solo (Nyagatare; Shingiro; Nyiranziringirimana, 2021). Esse desequilíbrio compromete a disponibilidade e o balanço de cátions essenciais, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e manejo adequado para evitar a degradação química e física do solo ao longo do tempo.

5.3.6 Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação por Bases (V%) e Percentual de Sódio trocável

No período chuvoso, a capacidade de troca catiônica (CTC) variou de 7,20 a 14,53 $cmolc\ dm^{-3}$, apresentando saturação por bases (V) igual a 100%, condição indicativa de elevada fertilidade e predominância de cargas ocupadas por cátions básicos. No período não chuvoso,

entretanto, a CTC reduziu para valores entre 1,19 e 2,67 cmolc dm^{-3}. A redução da CTC no período seco pode estar associada à menor umidade do solo, à mineralização da matéria orgânica e à concentração de sais por evapotranspiração, fatores que alteram a dinâmica do complexo de troca e a CTC efetiva em solos de cargas variáveis (Novais *et al*., 2007).

Em relação ao percentual de sódio trocável (PST), os valores médios observados no período chuvoso (2,02 ± 1,58%) caracterizam solos com baixo teor de sódio trocável, classificados como não sódicos e com reduzido potencial de degradação física. No período não chuvoso, verificou-se aumento do PST para 6,44%, indicando um nível moderado de sódio no complexo de troca. Embora esse valor permaneça abaixo do limite de 15% utilizado para caracterização de solos sódicos, o incremento observado representa um indicativo de acúmulo progressivo de sódio e merece atenção em sistemas irrigados continuamente com efluentes.

O aumento do PST pode favorecer, a longo prazo, processos de dispersão de argilas, redução da estabilidade dos agregados, diminuição da infiltração de água e da condutividade hidráulica do solo, comprometendo o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de água para as culturas. Esses efeitos tendem a ser mais pronunciados em ambientes semiáridos, onde a baixa precipitação e as elevadas taxas de evapotranspiração favorecem o acúmulo de sais na zona radicular (Hamidi, 2025).

Por outro lado, a redução da CTC e da soma de bases pode estar associada à maior atividade microbiana, à mineralização da matéria orgânica e à exportação de nutrientes pelas culturas irrigadas, processos que modificam a disponibilidade de sítios de troca e a composição do complexo sortivo (Illanes *et al*., 2026). Apesar dessas variações, os valores de PST permaneceram abaixo dos limites críticos para a ocorrência de sodificação, indicando que o reúso do efluente tratado não promoveu degradação estrutural significativa do solo durante o período avaliado.

Esses resultados corroboram os achados de Barbosa (2019) e evidenciam que, embora o reúso agrícola de águas cinzas tratadas apresente potencial para manutenção da fertilidade do solo, a elevação gradual do sódio trocável reforça a necessidade de monitoramento periódico da CTC, do PST, da condutividade elétrica e da razão de adsorção de sódio (RAS). O acompanhamento desses indicadores é fundamental para prevenir processos de salinização e sodificação, garantindo a sustentabilidade do uso contínuo de efluentes tratados em quintais produtivos do semiárido.

Em síntese, os achados indicam que, embora o reúso de águas cinzas tratadas contribua para o aporte de nutrientes como fósforo e potássio, ele também favorece o acúmulo progressivo de sódio e o aumento da salinidade, especialmente no período seco, elevando o risco de

sodificação e de degradação físico-química do solo ao longo do tempo. Assim, destaca-se a necessidade de monitoramento contínuo de indicadores como CE, PST, RAS, CTC e SB, aliado a práticas de manejo adequadas, a fim de garantir o equilíbrio nutricional, preservar a estrutura do solo e assegurar a sustentabilidade dos sistemas produtivos no semiárido.

5.4 Estratégia de manejo seguro e eficiente para o reúso dessas águas em sistemas produtivos da agricultura familiar

A adoção de critérios de manejo do sistema de reúso deve estar fundamentada em critérios técnicos que assegurem a qualidade da água destinada ao reúso e minimizem riscos sanitários e ambientais. Nesse sentido, os resultados obtidos neste estudo indicam a necessidade de dois eixos complementares de manejo: o monitoramento sazonal intensificado e a manutenção preventiva dos componentes do sistema.

O primeiro eixo decorre diretamente do padrão observado nas seções 5.2 e 5.3, onde o período seco concentrou os principais sinais de risco. Nesse período, foi observado o aumento da condutividade elétrica do solo, o acúmulo de fósforo, a elevação do Percentual de Sódio Trocável (PST) de 2,0% para 6,4%, acompanhada da redução da Capacidade de Troca Catiônica (CTC), evidenciando maior pressão sobre a qualidade do solo. Nesse sentido, torna-se necessário intensificar o monitoramento da água e do solo durante a estiagem, priorizando parâmetros como condutividade elétrica (CE), Relação de Adsorção de Sódio (RAS) e Percentual de Sódio Trocável (PST), que se mostraram mais sensíveis às alterações observadas nesse período.

Da mesma forma, como o enquadramento à Resolução COEMA nº 02/2017 verificado neste estudo, cobriu apenas pH, CE e RAS, e não incluiu SST, DBO_5, coliformes termotolerantes e ovos helmintos, a estratégia de manejo deve prever a incorporação desses parâmetros em ciclos futuros de monitoramento, especialmente nos quintais onde há cultivo de hortaliças de consumo cru.

O segundo eixo diz respeito à operação física do sistema. A eficiência do tratamento depende diretamente da manutenção contínua de seus componentes, onde a caixa de gordura, decanto-digestor, filtro biológico e tanque de irrigação exigem manutenção regular, limpeza programada e substituição de materiais filtrantes quando necessário. No caso específico dos filtros biológicos e do tanque de armazenamento de água cinza tratada disponível para irrigação, a remoção periódica de lodo e de sedimentos acumulados é fundamental para evitar a queda de eficiência e a perda de capacidade volumétrica (Campos, 1999; Chernicharo, 2007).

Destaca-se, ainda, que a manutenção preventiva de tubulações e dispositivos auxiliares também é essencial para evitar entupimentos, perdas operacionais e deterioração da qualidade do efluente tratado, sobretudo considerando que o desligamento do Quintal 04 durante o segundo semestre de 2025, por problema estrutural no sistema, demonstra na prática como falhas de manutenção comprometem a continuidade do reúso.

Assim, o monitoramento contínuo constitui em um dos pilares centrais para a gestão segura do reúso de águas cinzas na agricultura familiar, permitindo a avaliação sistemática da qualidade da água, do desempenho das unidades de tratamento, das condições do solo e da resposta das culturas (WHO, 2006; Bastos *et al*., 2008). Diante da tendência de sodificação identificada neste estudo, ainda distante do limite crítico de 15% (Richards, 1954), mas em trajetória de crescimento entre os períodos avaliados, esse acompanhamento sazonal, associado à manutenção preventiva e corretiva das estruturas de tratamento, deve ser incorporado como prática essencial de manejo nos quintais produtivos do semiárido, fornecendo subsídios para a tomada de decisão, o atendimento às diretrizes normativas e a garantia da sustentabilidade ambiental, econômica e operacional dos sistemas de reúso.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidencia que o tratamento e o reúso de águas cinzas em quintais produtivos constituem uma tecnologia social de relevância para a convivência com as limitações hídricas do Semiárido. O sistema modular avaliado apresentou desempenho consistente na melhoria de características físicas e químicas do efluente, com os valores de pH, condutividade elétrica (CE) e Razão de Adsorção de Sódio (RAS) situando-se, nas condições avaliadas, dentro dos critérios considerados para o reúso agrícola. Esses resultados indicam o potencial do sistema para o fornecimento de água destinada à irrigação, contribuindo para a manutenção da produção agrícola em condições de baixa disponibilidade hídrica.

Nos quintais produtivos avaliados, o reúso das águas cinzas esteve associado à manutenção de sistemas agrícolas diversificados, com áreas irrigadas variando entre 225 e 550 m² e presença de até 14 espécies vegetais, incluindo frutíferas, hortaliças e plantas medicinais. A predominância do autoconsumo demonstra a importância desses espaços para a segurança alimentar das famílias, enquanto a geração de excedentes destinados à doação e à comercialização em parte dos quintais evidencia outros benefícios associados à produção. Dessa forma, os resultados indicam que o reúso de águas cinzas ultrapassa a dimensão do aproveitamento hídrico, contribuindo para a diversificação produtiva, a manutenção dos quintais durante períodos de menor disponibilidade de água e o fortalecimento da agricultura familiar.

A oferta contínua de água para irrigação pode reduzir a dependência exclusiva da precipitação e favorecer a permanência dos cultivos durante o Período Seco. A presença de nutrientes, como o fósforo, nas águas tratadas representa um possível aporte ao sistema produtivo; entretanto, os efeitos desse aporte sobre a fertilidade do solo e sobre a necessidade de aplicação de fertilizantes minerais não foram avaliados neste estudo. Assim, essa característica deve ser compreendida como um potencial benefício do reúso, e não como uma redução comprovada da necessidade de insumos agrícolas.

Por outro lado, os maiores teores de sódio observados no efluente durante o Período Seco constituem um aspecto que merece atenção em aplicações contínuas. Embora o presente estudo não tenha avaliado diretamente o acúmulo de sódio no solo ou alterações em sua estrutura e fertilidade, a presença de sódio na água de irrigação reforça a importância do monitoramento de parâmetros relacionados à sodicidade, especialmente a RAS, associado ao acompanhamento das condições do solo. Práticas como cobertura do solo e manejo adequado

da drenagem podem ser consideradas estratégias complementares para o uso sustentável da água de reúso.

Este estudo apresenta limitações relevantes. O desenho amostral foi desbalanceado entre os períodos, com três coletas no Período Chuvoso e duas no Período Seco, além da redução de cinco para quatro quintais na segunda etapa. O enquadramento em relação à Resolução COEMA nº 02/2017 também foi restrito aos parâmetros efetivamente determinados no estudo, especialmente pH, CE e RAS, não sendo possível realizar uma avaliação completa dos requisitos de qualidade para o reúso agrícola, uma vez que SST, DBO_5 e indicadores microbiológicos não foram determinados. Além disso, o monitoramento contemplou um único ciclo anual e uma única configuração tecnológica, o que limita a extrapolação dos resultados para diferentes condições de operação e contextos produtivos.

Ainda assim, os resultados demonstram que o reúso descentralizado de águas cinzas apresenta potencial para contribuir simultaneamente para a segurança hídrica e alimentar em comunidades rurais do Semiárido, ao possibilitar o aproveitamento de uma fonte alternativa de água para a manutenção de quintais produtivos diversificados. Nesse sentido, a prática está alinhada aos princípios do ODS 6, especialmente quanto à ampliação da eficiência no uso da água e à busca por alternativas sustentáveis de gestão dos recursos hídricos.

Recomenda-se que pesquisas futuras ampliem o período de monitoramento para mais de um ciclo anual e agrícola, incorporem a determinação de SST, DBO_5 e indicadores microbiológicos e acompanhem sistematicamente a qualidade do solo, especialmente quanto à sodicidade e à salinidade. Também são necessários estudos que avaliem diferentes configurações de tratamento descentralizado, a viabilidade de replicação da tecnologia em outras comunidades e os efeitos sociais, econômicos e produtivos de longo prazo. O fortalecimento de políticas públicas, da assistência técnica e do acompanhamento dos sistemas instalados também se mostra fundamental para ampliar o uso seguro e sustentável dessa tecnologia social no Semiárido.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil:** potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ABDEL-SHAFY, H. I.; AL-SULAIMAN, A. M. Evaluation of physico-chemical processes for treatment and reuse of greywater. **Journal of Chemistry**, v. 57, n. 3, p. 215-231, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS ABNT. *NBR 8160:2020* – **Sistemas prediais de esgoto sanitário:** projeto e execução**.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Atlas Água e Esgotos:** abastecimento urbano**.** Brasília, DF: ANA, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020:** informe anual. Brasília, DF: ANA, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025.** Brasília, DF: ANA, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA**).** Consulta pública da NR de diretrizes para reúso não potável de água de efluentes da prestação do serviço de esgoto segue até 26 de fevereiro. Brasília, DF: ANA, 26 jan. 2026. Acesso em: 12 ago. 2026.

ALMEIDA, Ana Beatriz Batista de; SILVA, Fernando José Araújo da; MOREIRA, Yanka Wandréia Nogueira. O reúso de águas cinzas na agricultura familiar: benefícios, desafios e perspectivas no semiárido nordestino. **Revista Contribuciones a las CienciasSociales**, v. 17, n. 13, 2024.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.**23. ed. Washington, DC: APHA, 2017.

ANDRADE, L. A. et al. **Ecologia e conservação da Caatinga**. São Paulo: Editora Universitária da UFRN, 2018.

ARAUJO, José Edson de Albuquerque. **Saberes da água:**agroecopedagogia dos sistemas de reuso de água cinza para fins agrícolas por famílias do semiárido brasileiro. 2025. 139 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2025.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). **Cisternas e segurança hídrica no Semiárido brasileiro.** Recife: ASA, 2021.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). **Programa um milhão de cisternas (P1MC):** relatório técnico 2019. Recife: ASA, 2019.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). **Tecnologias sociais de convivência com o Semiárido.** Recife: ASA, 2017.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA. **Programa uma terra e duas águas** *(P1+2)*. Recife: ASA, 2017. Folder institucional.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13969:** Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17076***:* Efluentes de tanques sépticos - Tratamento complementar e disposição final. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 13969** : Tanques sépticos — Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos — Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 15227** : Geossintéticos - Determinação da espessura nominal de geomembranas termoplásticas lisas. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 16783** : Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Roma: FAO, 1999. (Irrigationand Drainage Paper, n. 29).

BAHIA. Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH). **Resolução CONERH nº 75, de 29 de julho de 2010.** Dispõe sobre diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água no Estado da Bahia. Salvador, 2010.

BAHREINI, Ali; MAHMOUDI, Amin; ABBASI, Mohsen; SHAHOUNI, Reza. Advanced multi-stage greywater treatment: sand filtration, electrocoagulation, and photo-Fenton for enhanced reuse potential. **Cleaner Engineering and Technology,** v. 32, p. 101195, 2026.

BARBOSA, Antonio Gomes; HERNÁNDEZ, David Gallar. A convivência com o Semiárido como superação do combate à seca no rural do Nordeste brasileiro: uma luta de paradigmas socioecológicos. **Historia Agraria**, n. 96, p. 203-241, ago. 2025.

BARBOSA, Mônica Teles. **Sistemas de reúso de águas cinzas domésticas para agricultura familiar:** o caso de comunidades rurais do estado do Ceará. 2019. 184 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública e Meio Ambiente) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2019.

BEGOSSO, L. O. **Reúso de água cinza em edificações**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BEZERRA, Aline Pessoa; BRITO, Virgínia da Costa; FRANÇA, Lorena Rayssa Cunha; SANTANA, Cícero Fellipe Diniz de**.** Utilização de fontes alternativas de água em habitações de baixa renda no semiárido brasileiro. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE – CONIMAS; CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO – CONIDIS, 1; 3, 2019, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Realize Editora, 2019.

BOANO, Fulvio; RIDOLFI, Luca; FIORE, Silvia; DEMICHELIS, Francesca; GALVÃO, Adriano; PADOAN, Enrico; RIGHETTO, Andrea. Greywater treatment technologies: a review. **Science of the Total Environment**, v. 711, p. 134731, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). **Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005**. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Brasília, 2005.

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

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, Brasília, 16 maio 2011.

BRASIL. **Lei nº 14.546, de 4 de abril de 2023**. Dispõe sobre o aproveitamento das águas de chuva e de reúso não potável das águas cinzas. Brasília, 2023.

BRASIL**. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.**Brasília, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caatinga:** características e importância ambiental. Brasília: MMA, 2021.

BUTLER, D.; FRIEDLER, E.; GATT, K. Characterisation of domestic wastewater flows. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 7, p. 13-24, 1995.

BUTT, Asim Qayyum; YASEEN, Ghulam; BACHAYA, Allah; LATIF, Abid. Unlocking water sustainability by addressing SDG 6: Macrophyte-based wastewater treatment for agricultural irrigation in Pakistan. **Physicsand Chemistryof the Earth**, v. 141, p. 104099, 2025.

CAVALCANTE FILHO, Pablo Niro; MEDEIROS, Milany Kárcia Santos; QUEIROZ NETO, Manoel Lindolfo; SOUZA JÚNIOR, Paulo Leite. Uma breve descrição dos principais sistemas de reúso de águas cinzas**.** In:CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, *8*, 2017, Campo Grande**.** ***Anais...*** Campo Grande: IBEAS, 2017.

CEARÁ. **Lei nº 16.033, de 20 de junho de 2016.**Institui a Política Estadual de Reúso de Água Não Potável. Fortaleza, 2016.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO CEARÁ (COEMA). **Resolução nº 02, de 02 de fevereiro de 2017.**Fortaleza, 2017.

CRADDOCK, Hillary A.; CHATTOPADHYAY, Suhana; RJOUB, Younes; ROSEN, David; GREIF, Jake; LIPCHIN, Clive; MONGODIN, Emmanuel F.; SAPKOTA, Amy R. Antibiotic and herbicide concentrations in household greywater reuse systems and pond water used for agricultural irrigation: West Bank, Palestinian Territories. **Science ofthe Total Environment**, v. 699, p. 134205, 2020.

CUNHA, Maria Elidayane da. **Monitoramento e avaliação socioambiental de sistema compacto para tratamento e uso agrícola de água cinza.** 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

DIAS, Nildo da Silva; ARAGÃO, Alison Rocha de; LIMA, Alexandre de Oliveira; SILVA, Márcia Regina Farias da; MEDEIROS, Alisson Gadelha de; MENDONÇA, Leonardo Ângelo; RIBEIRO, André Castro; FERNANDES, Rogério Taygra Vasconcelos; PORTO, Vania Christina Nascimento. Tecnologias sociais de convivência com o semiárido brasileiro: segurança hídrica e alimentar. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, Portugal, v. 17, n. 2, p. 01-25, 2025. DOI: 10.55905/cuadv17n2-066.

DOMBROSKI, Solange Aparecida Goularte; SILVA, JuciellyKarízia Medeiros da; SANTIAGO, Fábio dos Santos; JALFIM, Felipe Tenório. **Desempenho de uma unidade biológica filtrante de baixo custo utilizada para tratamento de água cinza gerada em residência rural do Semiárido do Rio Grande do Norte visando reúso na agricultura familiar.** In:*CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, *27***,** 2013, Goiânia. *Anais [...]*. Rio de Janeiro: ABES, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. - Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO RIO GRANDE DO NORTE (EMPARN). **Dados climatológicos do Rio Grande do Norte.** Natal: EMPARN, 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Guidelines for Water Reuse.** Washington, DC: U.S. EPA, 2012.

ERIKSSON, Eva; AUFFARTH, Karina; HENZE, Mogens; LEDIN, Anna. Characteristics of grey wastewater. **Urban Water**, v. 4, n. 1, p. 85-104, 2002.

ESPÍRITO SANTO. **Lei nº 10.487, de 13 de janeiro de 2016**. Dispõe sobre a política de reúso de água proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto no Estado do Espírito Santo. Vitória, 2016.

FERNANDES, Cleyton dos Santos. **Tecnologias sociais de convivência com o semiárido: acesso à água para o consumo e produção agrícola familiar**. 2023. 139 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.

FERREIRA, Elvis Pantaleão et al. Cisternas de produção para melhoria da qualidade de vida no Semiárido do estado de Pernambuco. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 4, p. 110-117, out./dez. 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **The wealth of waste: The economics of wastewater use in agriculture.** Rome: FAO, 2010.

FRIEDLER, E. Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse. **Environmental Technology**, v. 25, n. 9, p. 997-1008, 2004.

FRIEDLER, E.; BUTLER, D. Quantifying the inherent uncertainty in domestic wastewater quality and quantity. **Water Science and Technology**, v. 33, n. 2, p. 65-78, 1996.

FRIEDLER, Eran; GILBOA, Yael. Performance of UV disinfection and the microbial quality of greywater effluent along a reuse system for toilet flushing**. Science ofthe Total Environment,** n. 408, p. 2109-2117, 2010.

GALVÃO, Carlos Octaviano; ALCÂNTARA, Helder Medeiros. **Estratégias de adaptação e gestão do risco:** o caso das cisternas no Semiárido brasileiro. [S. l.]: ASA Brasil, 2015.

GHAITIDAK, D. M.; YADAV, K. D. Characteristics and treatment of greywater: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, n. 5, p. 2795-2809, 2013.

GHAITIDAK, D. M.; YADAV, K. D. Reuse of greywater: effect of coagulant. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, p. 2410-2421, 2015.

GILBOA, Yael; FRIEDLER, Eran. UV disinfection of RBC-treated light greywater effluent: Kinetics, survival and regrowth of selected microorganisms. **Water Research**, v. 42, n. 4-5, p. 1043-1050, 2008.

GROSS, A.; MAIMON, A.; ALFIYA, Y. **Greywater Reuse**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

HAMIDI, Muhammed Nimet. Greywater reuse for irrigation: a critical review of suitability, treatment, and risks. **Science of the Total Environment**, v. 975, p. 179272, 2025.

HIJOSA-VALSERO, M.; Matamoros, V.; SIDRACH-CARDONA, R.; MARTÍN-VILLACORTA, J.; BÉCARES, E.; BAYONA, J. M. Comprehensive assessment of the design configuration of constructed wetlands for the removal of pharmaceuticals and personal care products from urban wastewaters. **Water Research**, 44(12), 3669-3678, 2010.

ILLANES, Gabriel; ÁGUILA, Nadia; URZÚA-AHUMADA, Julio; MANQUIÁN-CERDA, Karen; ZÚÑIGA, Gustavo E.; ARCE, Roxana; ROMERO, Julio; ABEJÓN, Ricardo; QUIJADA-MALDONADO, Esteban. Impact of electrochemically treated greywater on green wall and roof irrigation: Effects on soils and plants. **Journal of Water Process Engineering**, v. 87, p. 110010, 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 2022:** resultados preliminares - Encanto (RN). Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2020.** Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

INSTITUTO DE ASSISTÊNCIA TECNICA E EXTENSÃO RURAL DO RIO GRANDE DO NORTE -EMATER-RN. **Diagnóstico agropecuário do município de Encanto-RN**. Natal: EMATER-RN, 2017.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE (IDEMA). **Perfil ambiental do Estado do Rio Grande do Norte.** Natal: IDEMA, 2020.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE (IDEMA). **Perfil do seu município:** Encanto/RN. Natal: IDEMA, 2020.

JEFFERSON, B. et al. Greywater characteristics and their impact on reuse technologies. **Water Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 157-164, 2004.

KUSUMAWARDHANA, A. et al. Microbial health risk assessment in water conservation strategies. **International Journal of Hygiene and EnvironmentalHealth**, v. 18, n. 5, 2021.

LAMEIRA, A. R. et al. Qualidade da água cinza e sua influência na fertilidade do solo. **Revista Ciência & Sustentabilidade**, v. 6, n. 1, p. 75-88, 2020.

LANCHIPA-ALE, Teresa; CRUZ-BALTUANO, Ana; MOLERO-YAÑEZ, Nahuel; CHUCUYA, Samuel; VERA-BARRIOS, Bertha; PINO-VARGAS, Edwin. Assessment of Greywater Reuse in a University Building in a Hyper-Arid Region: Quantity, Quality, and Social Acceptance. **Sustainability**, v. 16, n. 4, p. 1515, 2024.

LARSEN, T. A.; UDERT, K. M.; LIENERT, J. **Source Separation and Decentralization for Wastewater Management.**London: IWA Publishing, 2013.

LIMA, J. P.; MEDEIROS, S. S. Reuso de águas cinzas como estratégia de convivência com o semiárido. **Cadernos de Agroecologia**, v. 17, n. 1, p. 45-54, 2022.

MAIMON, Adi; GILBOA, Arye; GROSS, Amit. Greywater irrigation and soil quality: An assessment framework adjustment and application. **Soil & Environmental Health**, v. 1, p. 100034, 2023.

MARA, D. **Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries.** London: Earthscan, 2004.

MARCHIORI JÚNIOR, M. et al. Avaliação da qualidade de águas cinzas tratadas. *Revista* **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 81-89, 2020.

MARENGO, José A.; CUNHA, Ana Paula; ALVES, Lincoln Muniz. A seca no semiárido nordestino e os impactos das mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 1-18, 2020.

MAYER, Mateus Cunha *et al***. Tecnologia de tratamento de esgoto***:* uma alternativa de saneamento básico rural e produção de água para reúso agrícola no semiárido brasileiro. Santiago: CEPAL, 2020. (Caso, 76).

MEDEIROS, Y. D. P. et al. Impactos do uso de águas residuárias na qualidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 22, n. 7, p. 503-509, 2018.

MEDEIROS, Y. D. P.; SILVA, G. C. Reúso de águas cinzas na agricultura familiar. *Revista* **Brasileira de Agroecologia**, v. 14, n. 2, p. 224-233, 2019.

MELO, Roseli Freire de et al. Efeito da irrigação suplementar com águas cinzas nas características químicas de solos em quintais produtivos no município de Triunfo, PE. *XI* **Congresso Brasileiro de Agroecologia**, 2020.

MENDONÇA, L. C.; SANTOS, J. P.; CAVALCANTE, M. M. Uso de águas cinzas em quintais produtivos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 14, p. 125-138, 2019.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MISRA, R. K.; PATEL, J. H.; BAXI, V. R. Reuse potential of laundry greywater for irrigation based on growth, water and nutrient use of tomato**. Journal of Hydrology**, v. 386, p. 95-102, 2010.

MOHAN, S.; MANTHAPURI, V.; CHITTHALURI, S. Avaliando os fatores que influenciam as características das águas cinzas em todo o mundo: uma abordagem qualitativa e quantitativa com uma breve revisão sobre tecnologias de tratamento de águas cinzas**.DiscovWater** 4, 37, 2024.

MONSALVES, Naomi; LEIVA, Ana María; GÓMEZ, Gloria; VIDAL, Gladys. Organic Compounds and Antibiotic-Resistant Bacteria Behavior in Greywater Treated by a Constructed Wetland. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 3, 2305, 2023.

MOREL, A.; DIENER, S. **Greywater Management in Low and Middle-Income Countries.**Geneva: Eawag, 2006.

MOTA, L. V. C. et al. Tratamento de águas cinzas por filtros biológicos. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária,** v. 15, n. 2, p. 35-45, 2021.

NERES, Larissa Silva Rodrigues. **Análise físico-química e microbiológica da água cinza destinada para reúso não potável em residência unifamiliar** (estudo de caso)**.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), Brasília, 2018.

NIZEYIMANA, Ladislas et al. Grey Water Reuse To Enhance Home Kitchen Garden Production. **International Journal of Progressive Sciences and Technologies**, v. 37, n. 2, p. 343-348, 2023.

NOUTSOPOULOS, C. et al. Characterization of greywater and physico-chemical treatment to promote onsite reuse**. Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 337-346, 2018.

NSF INTERNATIONAL/ANSI. NSF/ANSI 350*:* **Onsite Residential and Commercial Water Reuse Treatment Systems**. Ann Arbor: NSF, 2022.

NSW HEALTH. **Greywater Reuse in Single Domestic Households.** Sydney: Government of New South Wales, 2010.

NYAGATARE, Guillaume; SHINGIRO, Christian; NYIRANZIRINGIRIMANA, Claire. Effect of domestic grey water reuse for irrigation on soil physical and chemical characteristics and tomatoes growth. **Journal of Agriculture and Environment for International Development,** v. 115, n. 2, p. 31-47, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo:** a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Nações Unidas, 2015.

OTENG-PEPRAH, M.; ACHEAMPONG, M. A.; DEVRIES, N. K. Greywatercharacteristics, treatment systems, reuse strategiesanduserperception-a review. **Water, Air, & Soil Pollution,** v. 229, n. 8, art. 255, 2018. DOI: 10.1007/s11270-018-3909-8.

OTENG-PEPRAH, M.; DE VRIES, N. K.; ACHIAMPONG, M. A. Greywater characteristics, treatment systems, reuse strategies and user perception - a review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 229, n. 8, p. 255-270, 2018.

OTTOSON, J.; STENSTRÖM, T. A. Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. **Water Research**, v. 37, n. 3, p. 645-655, 2003.

PALMQUIST, H.; HANÆUS, J. Hazardous substances in separately collected grey- and blackwater. **Science of the Total Environment**, v. 348, n. 1-3, p. 151-163, 2005.

PIDOU, Maeve; AVERY, Louise; STEPHENSON, Tom; JEFFREY, Paul; PARSONS, Simon A.; LIU, Sha; MEMON, Fayyaz A.; JEFFERSON, Bruce. Chemical solutions for greywater recycling. **Chemosphere**, v. 71, n. 1, p. 147-155, 2008.

RADINGOANA, Makgalake P.; DUBE, Timothy; MAZVIMAVI, Dominic. An assessment of irrigation water quality and potential of reusing greywater in home gardens in water-limited environments. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 116, p. 102857, 2020.

RAJAGOPALAN, V.; ABIRAMI, M.; YUVARAJA, N. Photodegradation of contaminants in bathroom wastewater under UV illumination source. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 2697-2700, 2020.

RAMOS MARQUES, M. A.; RIBEIRO IDE, L.; LOUREIRO PAULO, R. L. Reúso de água cinza em edificações: revisão de literatura sobre patógenos e tratamentos. **Revista Científica do ITPAC**, v. 11, n. 4, p. 38-48, 2018.

RAMPRASAD, C.; PHILIP, Ligy. Contributions of various processes to the removal of surfactants and personal care products in constructed wetland. **Chemical Engineering Journal,** v. 334, p. 322-333, 2018. DOI: 10.1016/j.cej.2017.09.106.

RICHARDS, L. A. (ed.). **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils.** Washington: USDA, 1954. (USDA Handbook, n. 60).

RIO GRANDE DO NORTE. **Lei nº 11.332, de 30 de dezembro de 2022**. Dispõe sobre a política de reúso de água não potável no âmbito do Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 2022.

ROJAS, Eli Morales; RASCÓN, Jesús; QUIÑONES HUATANGARI, Lenin; QUINTANA, Segundo Chavez; OLIVA, Manuel; MILLA PINO, Manuel Emilio. Mixed greywater treatment for irrigation uses. **Ambiente&Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 15, n. 6, e2599, 2020.

SANTANA, Carlos Maciel et al. **Bioágua no tratamento das águas cinzas para fins de irrigação.** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2020.

SANTIAGO, Fábio dos Santos *et al*. **Bioágua Familiar**: reuso de água cinza para produção de alimentos no Semiárido. Recife: Projeto Dom Helder Camara, 2012.

SANTOS, A. M. et al. Gestão ambiental municipal em cidades do semiárido potiguar. **Revista Geotemas**, v. 11, n. 2, p. 45-58, 2021.

SANTOS, D. R. dos et al. Alterações na estrutura e salinidade do solo irrigado com águas cinzas. **Ciência do Solo e Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, p. 87-96, 2019.

SERVIÇO DE APOIO AOS PROJETOS ALTERNATIVOS COMUNITÁRIOS (SEAPAC). **Água, semente da vida:** tratamento e reúso de águas cinza. Coordenação de Caio Barbosa. Rio Grande do Norte: SECOM-SEAPAC, 2024. 62 p.

SILVA, J. A.; SOUSA, R. P. A agricultura familiar no semiárido: desafios e perspectivas. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 47, p. 109-124, 2018.

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, M. A.; SOUSA, T. F. Reuso de águas residuárias no semiárido. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, n. 2, p. 85-92, 2021.

SILVA, Juan Monteiro da. **Gestão de recursos hídricos em propriedades rurais do semiárido**. 2021. 216 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé - PB, 2021.

SILVA, Juliano Rezende Mudadu; CELERI, Maurício de Oliveira; BORGES, Alisson Carraro; FERNANDES, Raphael Bragança Alves. Greywater as a water resource in agriculture: the acceptance and perception from Brazilian agricultural technicians. **Agricultural Water Management**, v. 280, p. 108227, 2023.

SILVA, R. F. **Avaliação da viabilidade de reúso da água cinza tratada em filtro biológico. 2020**. Monografia (Especialização em Saneamento Ambiental) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

SOUZA, B. A.; OLIVEIRA, L. M. R. Segurança alimentar e nutricional em agroecossistemas familiares como resultado do reúso de água cinza em agroflorestas: A experiência do Projeto Terra de Vidas II em Ouricuri - PE. **Revista Brasileira de Agroecologia,** v. 1, n. 5, p. 523-544, 2023

SOUZA, E. S. de *et al*. Reúso de água doméstica na agricultura familiar do semiárido. **Revista de Extensão e Estudos Rurais,** v. 4, n. 1, p. 22-30, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**.3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TRAVIS, Michael J.; WIEL-SHAFRAN, Alit; WEISBROD, Noam; ADAR, Eilon; GROSS, Amit. Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties. **Science of the Total Environment,** v. 408, p. 2501-2508, 2010.

TURNER, R. D. et al. Greywater irrigation as a source of metals in soils**. Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 806-817, 2016.

ORGANIAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA - Unesco. **United nations world water development report 2024:** Water for Prosperity and Peace. Paris: UNESCO, 2024.

VENTURA, Andréa Cardoso; GARCIA, Luz Fernández; ANDRADE, José Célio Silveira. O potencial das tecnologias sociais de convivência com o semiárido para a geração de sinergia entre mitigação e adaptação às mudanças climáticas: um caso ilustrativo. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 50, n. 1, p. 65-83, 2019.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

WANG, X.; KIM, J. Greywater reuse as a key factor in urban wastewater management. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 16, 100277, 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater.** Volume 4: Excreta and Greywater Use in Agriculture. Geneva: WHO, 2006.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Potable reuse:** guidance for producing safe drinking-water. Geneva: WHO, 2017.

YALIN, David et al. Mitigating risks and maximizing sustainability of treated wastewater reuse for irrigation. **Water Research X**, v. 21, 100203, 2023.

APÊNDICE A: QUINTAL PRODUTIVO: REUTILIZANDO ÁGUA E PRODUZINDO VIDA NO SEMIÁRIDO - UMA HISTÓRIA SOBRE ÁGUA, SOLO E AGRICULTURA SUSTENTÁVEL