



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

DANYLLO VIEIRA DE LUCENA

**DIRETRIZES PARA PLANO DE SEGURANÇA DA ÁGUA PARA SOLUÇÕES
ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO EM COMUNIDADES RURAIS
DISPERSAS**

Campina Grande – PB

2024

DANYLLO VIEIRA DE LUCENA

**DIRETRIZES PARA PLANO DE SEGURANÇA DA ÁGUA PARA SOLUÇÕES
ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO EM COMUNIDADES RURAIS
DISPERSAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientadores:

Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura

Prof. Dr. Rui de Oliveira

CAMPINA GRANDE – PB

2024

L935d Lucena, Danyllo Vieira de.
Diretrizes para plano de segurança da água para soluções alternativas de abastecimento em comunidades rurais dispersas / Danyllo Vieira de Lucena. – Campina Grande, 2024.
124 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.
"Orientação: Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura, Prof. Dr. Rui de Oliveira".
Referências.

1. Acesso à Água Para Populações Dispersas. 2. Ozonização da Água. 3. Plano de Segurança da Água (PSA). 4. Sistemas de Abastecimento de Água. 5. Tratamento de Água. I. Coura, Mônica de Amorim Coura. II. Oliveira, Rui de. Título.

CDU 628.1(043)

DANYLLO VIEIRA DE LUCENA

**DIRETRIZES PARA PLANO DE SEGURANÇA DA ÁGUA PARA SOLUÇÕES
ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO EM COMUNIDADES RURAIS
DISPERSAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Aprovado em: 05 / 09 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente

gov.br

MONICA DE AMORIM COURA

Data: 05/09/2024 14:57:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Mônica de Amorim Coura (Orientadora)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Documento assinado digitalmente

gov.br

RUI DE OLIVEIRA

Data: 05/09/2024 21:47:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rui de Oliveira (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Andréa Carla Lima Rodrigues

Prof. Dra. Andréa Carla Lima Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Documento assinado digitalmente

gov.br

RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO

Data: 06/09/2024 11:26:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Ruth Silveira do Nascimento (Membro externo)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Documento assinado digitalmente

gov.br

JUSCELINO ALVES HENRIQUES

Data: 06/09/2024 09:08:30-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juscelino Alves Henriques (Membro externo)
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

*Ao meu pai do céu **Deus**, aos meus pais **Damião** e **Socorro**, a minha irmã **Danielly**, e a minha esposa **Iasmim**, pelo o apoio, dedicação, companheirismo e amizade, por sempre estarem ao meu lado.*

Eu dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, o meu criador acima de tudo, por me conceder calma nos momentos de desespero, me dá acalento na falta de esperança e me dá luz na escuridão. Te amarei por todos os dias na minha vida.

Ao meu Pai, Damião, por ser essa pessoa exemplar, pelo apoio irrestrito em todos os momentos da minha vida e por ter me passado princípios tão nobres em tempos difíceis de relativização do certo e errado. Obrigado por ser esse exemplo vivo de determinação e nunca medir esforços pela sua família, terás para sempre a minha gratidão.

À minha mãe, Socorro, o amor incondicional da minha vida, obrigado por todo apoio nos momentos de dificuldades, por todo o cuidado e sacrifício e por todas as noites em claro. Que agora está com o nosso senhor, Pai Deus, descanse em paz.

À minha esposa e companheira, Iasmim Vieira, que nunca mediu esforços para me ajudar, sempre esteve ao meu lado e agora estaremos até o fim da nossa vida terrena. Obrigado por estar ao meu lado nesses últimos 13 anos, me dando conselhos e ensinamentos.

À minha irmã, Danielly, que sempre me apoiou e ofereceu conselhos valiosos. Seu exemplo dentro de casa me mostrou que todas as dificuldades são importantes e que, com perseverança, a recompensa chega no momento certo.

À Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura, por ser mais do que uma orientadora acadêmica, é também uma conselheira cujas lições levarei para a vida. Sou grato pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pelo estímulo acadêmico, por todas as suas contribuições e pela sua paciência. Espero um dia alcançar pelo menos 1% da profissional que a senhora é.

Ao Prof. Dr. Rui de Oliveira, por me auxiliar desde a graduação com seu profundo conhecimento na área de saneamento ambiental, por seus conselhos, correções e bom humor.

Aos participantes da banca examinadora, Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento, Profa. Dra. Andréa Carla Lima Rodrigues e Prof. Dr. Juscelino Alves Henriques, por todas as contribuições prestadas e ensinamentos. Meu muito obrigado.

A todos os professores que fazem parte do doutorado em Engenharia Civil e Ambiental, os meus sinceros agradecimentos por todos os ensinamentos passados e por serem verdadeiros educadores.

A todos os meus amigos e companheiros de pós-graduação, em especial, ao Prof. Igor Souza Ogata por todo o companheirismo e incessante presteza em me ajudar durante toda essa caminhada. Terá sempre meu agradecimento e amizade.

Por fim, dedico a todas as pessoas que vivem em comunidades rurais desse país, em especial as do semiárido brasileiro, que muitas vezes só têm a sua fé para se agarrar, muitas vezes vivendo em total desalento, essa é a minha pequena contribuição para vocês. Com a sincera esperança de que os gestores dessas regiões tenham um olhar especial para esse povo tão aguerrido, mas sofrido, que muitas vezes busca apenas o seu direito fundamental, a vida.

RESUMO

A utilização de solução alternativa de abastecimento de água para consumo humano mostra-se como uma opção para tentar mitigar a problemática do acesso à água nas zonas rurais para populações dispersas. O grande desafio dessas soluções para os gestores é a manutenção da segurança sanitária da água, visto que são sistemas de múltiplas entradas, os quais são difíceis de predição dos perigos. O modelo de gestão recomendado para sistemas de abastecimento, solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano (SAC) e solução alternativa individual de abastecimento de água para consumo humano (SAI), pela *World Health Organization* (WHO) e posteriormente pela Portaria GM/MS nº 888 de 2021, é o Plano de Segurança da Água (PSA), uma ferramenta robusta e confiável, por isso de difícil implementação por essas soluções. Trabalhos anteriores constataram a necessidade da simplificação do PSA, mantendo os ganhos para a população com a sua implementação desse instrumento, o qual se baseia no princípio das múltiplas barreiras, que pode ser visto como uma série de boas práticas para garantir a segurança da qualidade da água disponível para consumo humano. Uma das ferramentas utilizadas pelo PSA é a análise de risco. Essa ferramenta é essencial para identificar os perigos no abastecimento de água. Através dela, é possível reconhecer os principais riscos e, a partir dessas informações, desenvolver medidas de controle para mitigar os problemas identificados. Assim, o trabalho teve como objetivo propor diretrizes para plano de segurança da água para soluções alternativas de abastecimento em comunidades rurais, de forma simplificada, possibilitando sua aplicação em localidades dispersas. O estudo avaliou cinco soluções alternativas de abastecimento, são elas: captação de água de chuva, poços rasos ou tubulares, abastecimento com rede convencional, captação direta em mananciais superficiais (rios, nascentes e reservatórios) e abastecimento por veículo transportador (Caminhão-pipas regulamentados ou autônomos). Para tal, foi utilizada a análise de risco de processo com a metodologia *Hazard and Operability Study* (HAZOP), para identificar os principais desvios, suas consequências e as providências necessárias para cada fonte de abastecimento e *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) de produto para hierarquização dos perigos na água de abastecimento. O HAZOP identificou como os principais desvios operacionais o acúmulo de sedimentos, as falhas de manutenção e interrupções no fornecimento de água, os quais comprometem a segurança sanitária da água. Já o FMEA identificou a presença de *Escherichia coli* e coliformes totais como os principais riscos para o produto, seguidos pelos indicadores de baixa concentração de cloro residual livre (CRL) e alta turbidez. A partir dessas análises, se desenvolveram protocolos de ações e recomendações práticas para soluções alternativas, *checklist* de procedimentos de segurança sanitária para soluções alternativas de abastecimento e as ações do processo de condução da auditoria do PSA. Paralelamente, foi desenvolvido um sistema de desinfecção por meio de ozonização, compacto e de fácil operação, visando ser uma alternativa como uma medida de adequação e controle do PSA, auxiliando a manutenção da qualidade microbiana das águas. O sistema obteve bons resultados na inativação de coliformes totais e *Escherichia coli* em 100% das análises de águas oriundas de cisternas e poços no universo amostral de $n = 30$. Entretanto, teve uma eficiência inferior em águas advindas de captação direta de açudes, obtendo eficiência de 86,66% na remoção de coliformes totais e 90% de *Escherichia coli*.

Palavras-chave: Acesso à água para populações dispersas. Ozonização da água. PSA. Sistemas de abastecimento de água. Tratamento de água.

ABSTRACT

The use of alternative water supply solutions for human consumption is an option to try to mitigate the problem of access to water in rural areas for dispersed populations. The great challenge for managers of these solutions is maintaining water safety, since they are multi-entry systems, which are difficult to predict hazards. The management model recommended for supply systems, collective alternative water supply solutions for human consumption (SAC) and individual alternative water supply solutions for human consumption (SAI), by the World Health Organization (WHO) and subsequently by Ordinance GM/MS No. 888 of 2021, is the Water Security Plan (PSA), a robust and reliable tool, which is therefore difficult to implement by these solutions. Previous studies have found the need to simplify the PSA, while maintaining the benefits for the population with its implementation of this instrument, which is based on the principle of multiple barriers, which can be seen as a series of good practices to ensure the safety of the quality of water available for human consumption. One of the tools used by the PSA is risk analysis. This tool is essential for identifying hazards in water supply. It allows us to recognize the main risks and, based on this information, develop control measures to mitigate the problems identified. Thus, the study aimed to propose guidelines for a water safety plan for alternative supply solutions in rural communities, in a simplified way, enabling its application in dispersed locations. The study evaluated five alternative supply solutions, namely: rainwater harvesting, shallow or tubular wells, supply with conventional network, direct collection from surface sources (rivers, springs and reservoirs) and supply by transport vehicle (regulated or autonomous tanker trucks). To this end, process risk analysis was used with the Hazard and Operability Study (HAZOP) methodology to identify the main deviations, their consequences and the necessary measures for each supply source and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of product to prioritize the hazards in the water supply. The HAZOP identified sediment accumulation, maintenance failures and interruptions in water supply as the main operational deviations, which compromise the sanitary safety of the water. The FMEA identified the presence of *Escherichia coli* and total coliforms as the main risks to the product, followed by indicators of low free residual chlorine (FRC) concentration and high turbidity. Based on these analyses, action protocols and practical recommendations for alternative solutions were developed, as well as a checklist of sanitary safety procedures for alternative supply solutions and the actions of the PSA audit process. At the same time, a compact and easy-to-operate ozonation disinfection system was developed, aiming to be an alternative as a measure for adequacy and control of the PSA, helping to maintain the microbial quality of the water. The system obtained good results in the inactivation of total coliforms and *Escherichia coli* in 100% of the analyses of water from cisterns and wells in the sample universe of $n = 30$. However, it had a lower efficiency in water coming from direct capture of reservoirs, obtaining an efficiency of 86.66% in the removal of total coliforms and 90% of *Escherichia coli*.

Keywords: Access to water for dispersed populations. Water ozonation. PSA. Water supply systems. Water treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais indicadores da qualidade da água.....	24
Figura 2 – Organização institucional do Programa de Vigilância em Saúde Ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano.....	25
Figura 3 – Ações básicas para operacionalização da vigilância da qualidade da água potável no Brasil	26
Figura 4 - Exemplos de soluções alternativas de abastecimento de água para consumo humano	32
Figura 5 - Exemplo de matriz qualitativa de priorização de risco do SANASA	42
Figura 6 - Etapas para o desenvolvimento de um Plano de Segurança da Água	43
Figura 7 - Identificação de pontos críticos de controle	44
Figura 8 – Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas no estudo	50
Figura 9 – Fontes de abastecimento em localidades dispersas	53
Figura 10 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação de água de chuva.....	55
Figura 11 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação de água subterrânea (poços)	56
Figura 12 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via rede de distribuição convencional.....	57
Figura 13 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação direta de manancial superficial (rios, nascentes e reservatórios)	58
Figura 14 – Fluxograma esquemático do abastecimento de água em comunidades dispersas via caminhões-pipa regulamentados ou autônomos	58
Figura 15 – Fluxograma esquemático da etapa suplementar	64
Figura 16 - Fluxograma das etapas metodológicas do desenvolvimento do sistema de desinfecção via ozonização.....	65
Figura 17 – Planejamento experimental dos sistemas.....	67
Figura 18 – Instalação do Ozonizador	68
Figura 19 – Esquema o sistema de desinfecção via ozonização	69
Figura 20 - Detalhamento do sistema de ozonização.....	69
Figura 21 – Análise de Coliformes totais e <i>Escherichia coli</i>	70
Figura 22 – Passos para desenvolver o Plano de Segurança da Água	71
Figura 23 – Plano de segurança simplificado.....	72

Figura 24 – Resultados das análises de coliformes totais.....	91
Figura 25 – Resultados das análises de <i>Escherichia coli</i>	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores utilizados na composição do IQA e seus pesos.....	22
Tabela 2 – Classificação da água com base nas faixas do IQA.....	22
Tabela 3 - Indicadores de saúde para doenças infecto-parasitárias e relacionadas à poluição hídrica no Brasil e suas regiões, no ano de 2023.....	27
Tabela 4 – Disponibilidade hídrica nos estados do Brasil.....	28
Tabela 5 – Evolução das legislações federais acerca do saneamento	30
Tabela 6 – Apanhado das legislações e normativas federais mais recentes e relevantes no âmbito do saneamento relacionado com a água, tanto natural como para consumo.....	31
Tabela 7 – Parâmetros de referência utilizados para realização do HAZOP de processo	60
Tabela 8 – Critérios de classificação de risco para SAA e SAC	61
Tabela 9 - Matriz de classificação de risco	62
Tabela 10 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via captação de água de chuva.....	75
Tabela 11 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais captação de água subterrânea (poços)	78
Tabela 12 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via rede de abastecimento	80
Tabela 13 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via captação direta de manancial superficial (rios, nascentes e reservatórios).....	82
Tabela 14 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via caminhão-pipas regulamentados ou autônomos	85
Tabela 15 – Tabela FMEA de produto	86
Tabela 16 – Resultado da classificação riscos individuais para o FMEA de produto.....	90
Tabela 17 – Protocolo de ações e recomendações práticas para soluções alternativas ...	93
Tabela 18 – Checklist de procedimentos de segurança sanitária para soluções alternativas de abastecimento.....	97
Tabela 19 – Quadro das ações sintetizadas do processo de condução da auditoria PSA	98
Tabela 20 – Resultados das análises de coliformes totais.....	122
Tabela 21 – Resultados das análises de <i>Escherichia coli</i>	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

31°BIMtz	31° Batalhão de Infantaria Motorizada
ANA	Agência Nacional das Águas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CF	Constituição Federal
CGVAM	Coordenação Geral de Vigilância Ambiental em Saúde
DENSP	Departamento de Engenharia de Saúde Pública
DNSP	Departamento Nacional de Saúde Pública
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GM/MS	Ministério da Saúde - Gabinete do Ministro
IQA	Índice de Qualidade da Água
LAPECA	Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais
NSF	<i>National Sanitation Foundation</i>
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PSA	Plano de Segurança da Água
SAA	Sistema de abastecimento de água para consumo humano
SAC	Solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano
SAI	Solução alternativa individual
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SISAGUA	Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano
SUS	Sistema Único de Saúde
SVS	Secretaria de Vigilância em Saúde
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Disponibilidade hídrica	18
3.1.1 Água como direito humano.....	18
3.1.2 Qualidade da água.....	20
3.1.3 Impacto da ausência do saneamento na saúde pública	26
3.1.4 Distribuição hídrica no Brasil.....	28
3.1.5 Marcos regulatórios	29
3.2 Soluções alternativas de abastecimento	31
3.3 Abastecimento de água no meio rural	33
3.3.1 Gestão de água segura para populações dispersas na área rural	35
3.4 Plano de Segurança da Água (PSA)	40
3.5 Análise de Risco	46
3.6 Ozonização	48
4. METODOLOGIA	50
4.1 Etapas preliminares	51
4.1.1 Definição da equipe técnica.....	51
4.1.2 Legislação vigente para soluções alternativas de abastecimento	52
4.2 Avaliação das soluções alternativas de abastecimento	52
4.2.1 Descrição das soluções alternativas de abastecimento	52
4.2.2 Identificação dos perigos	54
4.3 Análise de risco	59
4.3.1 Levantamento dos dados	59
4.3.2 Definição e aplicação das ferramentas de análise de risco	59
4.3.3 Definição das medidas de controle	63
4.3.3.1 <i>Desenvolvimento de sugestão medida de controle</i>	63
4.3.3.2 <i>Sistema compacto de desinfecção via ozonização</i>	64
4.4 Plano de Segurança da Água	71
4.4.1 Estabelecimento de ações corretivas	72

4.4.2 Estabelecimentos de procedimentos de rotina.....	72
4.4.3 Protocolo, checklist e auditoria	72
5. RESULTADOS	72
5.1 Análise de risco – Hazop de processo.....	72
5.2 Análise de risco – FMEA de produto.....	86
5.3 Monitoramento operacional do sistema de ozonização.....	90
5.4 Pano de Segurança da Água rural	93
6. DISCUSSÃO	99
7. CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS.....	104
APÊNCIDE A	122
APÊNDICE B.....	123

1 INTRODUÇÃO

Os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios mostram o atual cenário do saneamento no meio rural no Brasil. Segundo o levantamento, apenas 32% dos domicílios rurais estão ligados à rede de distribuição de água (com ou sem canalização interna), sendo que o restante (68% das residências) utiliza soluções alternativas coletivas ou individuais de abastecimento, como o uso de captação direta de água da chuva, coleta em reservatórios superficiais (açudes e lagos) sem tratamento, poços e a coleta direta em nascentes de rios (IBGE, 2023). Além disso, é possível constatar que o percentual da população abastecida apenas por soluções alternativas aumenta conforme diminui o tamanho do município, com os maiores percentuais identificados em municípios com menos de 10 mil habitantes (Brasil, 2021a; Brasil, 2022; Oliveira *et al.*, 2017).

Segundo a Portaria GM/MS Nº 888 de 2021, do Ministério da Saúde, soluções alternativas de abastecimento são caracterizadas pela modalidade de abastecimento de captação de água subterrânea ou superficial, com ausência ou presença de canalização, sem rede de distribuição, sendo classificadas em individuais ou coletivas (Brasil, 2021b). Esse tipo de abastecimento é empregado, comumente, em áreas rurais, “devido aos elevados custos para o poder público de implantação do sistema convencional de distribuição nessas localidades” (Busch, 2009; Carrard, 2020; Kohlitz, 2019).

A utilização de soluções alternativas de abastecimento em regiões difusas vem ganhando notoriedade nos últimos anos como meio de garantir o acesso a água potável em regiões dispersas (Budeli; Moroopeng; Momba, 2021; McNabb, 2019; Oppenheimer *et al.*, 2017). Como também, a utilização de técnicas de tratamento simplificadas como a filtração e desinfecção, as quais, são amplamente conhecidas e utilizadas para adequar a água para o consumo humano em diversas localidades no mundo (Alexandratos *et al.*, 2019; Shannon *et al.*, 2008; Westerhoff; Boyer; Linden, 2019).

As doenças diarreicas agudas (DDA) estão entre as principais problemáticas relacionadas à quantidade e à qualidade das águas distribuídas por soluções alternativas de abastecimento, havendo uma relação direta do aumento da incidência de casos com a utilização dessas soluções (Odagiri *et al.*, 2017; Tribbe *et al.*, 2021; Whittington; Radin; Jeuland, 2020). Anualmente cerca de 1,7 bilhão de crianças menores de 5 anos tem alguma patologia do tipo DDA, os óbitos chegam a 525 mil casos, sendo assim, uma das principais causas de mortalidade infantil no mundo e um grave problema de saúde pública (Brasil, 2022).

Dentro desse contexto, a World Health Organization (WHO, 2017) propõe a utilização do esquema conceitual do Plano de Segurança da Água (PSA) para consumo humano com foco na manutenção da qualidade da água potável, tal como preconizado pelas suas diretrizes. O PSA é definido como um instrumento que utiliza análise de risco para identifica e prioriza riscos plausíveis que ocorrem em um sistema de abastecimento ou solução alternativa, desde a origem da água bruta até a torneira do consumidor. O seu propósito é a elaboração de um documento que detalhe os métodos e ações que devem ser estabelecidas para o desenvolvimento do plano de gestão de risco e comunicação dos sistemas de qualidade da água, por meio da utilização de medidas de adequação e controle para reduzir ou eliminar os riscos do processo (Philippi; Sobral, 2019).

O seu principal objetivo é o de garantir a qualidade da água para consumo humano mediante a utilização do conceito de múltiplas barreiras, que pode ser visto como uma série de boas práticas no sistema ou solução alternativa de abastecimento de água, tais como: minimização da contaminação nas origens de água, redução ou remoção da contaminação durante o processo de tratamento, prevenção de pós-contaminação durante o armazenamento, a distribuição e o manuseio da água na distribuição (Brasil, 2012; Siwila; Brink, 2020). Segundo a WHO (2009), o processo de tratamento da água é uma das melhores formas de garantir a sua qualidade e segurança.

A adaptação do Plano de Segurança da Água para uma aplicação mais adequada em comunidades dispersas, mostra-se como importante abordagem técnica para melhoria das condições sanitárias dessas regiões, de modo que a população possa sentir-se verdadeiramente contemplada com a implementação dessas mudanças e, assim, gozar efetivamente da evolução do processo (Aali *et al.*, 2021; Herschan *et al.*, 2020; Setty; Ferrero, 2021; String *et al.*, 2020; Rand *et al.*, 2022).

No Brasil, seguindo as diretrizes da WHO, desde de 2004 a Portaria MS nº1469/2000 foi reeditada para a atender as necessidades relativas ao PSA, resultando na Portaria MS nº 518/2004, continuando presente até a atualidade na Portaria GM/MS nº 888. Diante do exposto, esse estudo terá o objetivo de propor um modelo simplificado de PSA para zonas rurais no seminário, tendo em vista, a viabilização de sua aplicação nessas localidades diante dos desafios estruturais encontrados (Brasil, 2004; CONAMA, 2011).

Além da empregabilidade do PSA, a proposição de um processo de desinfecção para adequação da qualidade de água para zonas rurais surge como uma alternativa para essas populações que, em sua grande maioria, utilizam pouco ou nenhum tratamento na água de consumo (Gee; Sojka, 2022; Leonard; Gato-Trinidad, 2021). Nesse sentido, o processo de

ozonização surge como uma alternativa para garantir a qualidade sanitária das águas nessas regiões, sendo uma ótima opção pela sua eficiência na remoção de microrganismos patogênicos (Daniel; Leite, 2021; Hasballah; El-Gohary; El-Battrawy, 2023).

Por fim, este estudo foi motivado pelo diagnóstico das condições sanitárias das soluções alternativas de abastecimento de Campina Grande – PB, na zona rural do município, no semiárido paraibano, com a utilização de análise de risco (Lucena, 2018). Assim, foi constatada a necessidade do emprego de um modelo de gestão focado na melhoria da qualidade da água nessas localidades resultando, conseqüentemente, em melhoria da qualidade de vida para a população com a aplicação desse instrumento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Propor diretrizes para um plano de segurança da água para soluções alternativas de abastecimento, de forma simplificada, possibilitando sua aplicação em comunidades rurais dispersas de pequeno e médio portes.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os perigos e propor medidas de controle para as soluções alternativas de abastecimento;
- Estabelecer protocolos de rotina com medidas de controle voltados para comunidades rurais que utilizem soluções alternativas de abastecimento a partir da utilização de análise de risco;
- Analisar experimentalmente a viabilidade da utilização do sistema de desinfecção via ozonização de águas em soluções alternativas de abastecimento, de modo que seja uma das ferramentas utilizadas para auxiliar como medida de controle na aplicação do plano de segurança da água.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Disponibilidade hídrica

A água, cada vez mais, mantém-se como um dos recursos mais importantes do planeta, visto que é a base para a grande maioria das atividades humanas, como também, é um bem que vem ganhando progressivamente mais notoriedade pela sua rápida depreciação e falta de disponibilidade. Assim sendo, destacam-se os discursos sobre quais ações vêm sendo tomadas para garantia e segurança desse recurso para as gerações futuras (Boretti; Rosa, 2019; Larsen *et al.*, 2019).

3.1.1 Água como direito humano

A importância do fornecimento de água potável para manutenção da vida e bem-estar dos seres humanos é inegável. Nesse contexto, uma das diretrizes que é adotada mundialmente para garantir essa realidade, é assumir que a água é um direito fundamental e, segundo a ONU, é uma “condição para o gozo pleno da vida e dos demais direitos humanos”. Assim, pretende garantir o fornecimento mínimo de água de qualidade para toda a população (ONU, 2015; Sousa, 2019).

Diante desse cenário, o qual a água foi elevada a um direito humano, todas as nações signatárias desse acordo da ONU ficam obrigadas a reconhecer esse direito para toda sua população, como qualquer outro direito fundamental garantido a ela. É adequado, entretanto, entender que esse assume os atributos de um direito social e/ou cultural, contudo, não deixa de ser um direito adquirido e que deve ser cumprido, dando maior dignidade às populações mais vulneráveis do mundo (Bos, 2017; Miranda *et al.*, 2019; Reis; Carneiro, 2021). Dessa forma, a edição de legislação que vise a garantia desse direito é fundamental na proposição de políticas públicas.

No Brasil, foi a partir dos anos 1980, com a instituição da Política Nacional do Meio Ambiente e a criação do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, que o país passou a contar com um arcabouço legal sobre as questões ambientais (Pereira, 2015). Entretanto, esse direito pôde ser fundamentado com a aprovação, no ano de 1997, da Política Nacional de Recursos Hídricos, e com a criação no ano 2000 de um órgão governamental responsável pela gestão dos recursos hídricos nacionais, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (Augusto *et al.*, 2012).

Essa evolução da legislação só se torna possível com a garantia de água potável para todas as pessoas, aplicando os princípios da universalidade, igualdade e equidade. A universalização do acesso a água como um direito primário a todos, à igualdade, na disponibilização de água para o atendimento das pessoas igualmente sem qualquer tipo de distinções, e a equidade, o estabelecimento de ferramentas para a garantia desse recurso para os mais vulneráveis (Daniel; Cabral, 2011).

A manutenção das características benéficas dos recursos hídricos transpassa pela proteção da fonte de água e por um controle gerencial de todas as etapas do processo de captação, tratamento, reservação e distribuição dessas águas. Esses procedimentos devem-se adequar a características locais, levando em consideração fatores relevantes como aspectos sociais, ambientais, econômicas e culturais da região (Brasil, 2019).

A disponibilidade da água para o consumo humano advém da viabilidade da captação desses recursos em lagos, rios e aquíferos com possibilidade de extração (Tucci; Hespanhol; Cordeiro Netto, 2001). Entretanto, águas oriundas de fonte duvidosa sem os devidos processos de tratamento para sua potabilização são potenciais veículos de espécies nocivas à saúde (Camacho, 2011; Chowdhar *et al.*, 2020; Naik *et al.*, 2019).

Embora direito fundamental, a falta de capacidade dos sistemas de abastecimento convencionais em fornecer água de qualidade e em quantidade suficiente para a população, como também, a intermitência no fornecimento de água, é uma difícil realidade de vários municípios brasileiros. Esse entrave está diretamente relacionado com a falta de acesso aos serviços de saneamento básico, agravado, principalmente, em regiões nas zonas rurais (Giatti; Cutolo, 2012).

Associado a isso, a intensa exploração dos recursos naturais de forma descontrolada em atividades antropogênicas - para satisfazer as demandas da “vida moderna”, vem acarretando um perigoso distúrbio ambiental, em especial uma mudança significativa nos ciclos hidrológicos (Koutsoyiannis, 2020; Madakumbura *et al.*, 2019; Snyder *et al.*, 2019).

Nesse contexto, as comunidades rurais de países subdesenvolvidos são as que mais sentem esses impactos, visto que, essas áreas, historicamente, já têm uma grande dificuldade para manter e obter água com qualidade e quantidade, resultando por diversas vezes em problemas de saúde (Hasan; Shahriar; Jim, 2019; Klamt, 2021; Li; Wu, 2019).

Em todo o mundo a elevação do uso de água para as atividades agrícolas, industriais e de mineração vem afetando de forma danosa esse recurso hídrico. A deposição de diversos contaminantes como metais pesados e pesticidas, entre outros, aceleram o processo de degradação da qualidade da água e, aumenta os níveis de toxicidade dos rios e lagos (Addo-

Bediako *et al.*, 2014; Jankowiak *et al.*, 2019; Sankhla; Kumar; Biswas, 2019; Wood *et al.*, 2020).

Tudo isso sem esquecer as limitações globais impostas pelo cenário atual e futuro, como, a estiagem em grandes regiões do nosso planeta, a necessidade de significativos investimentos em infraestruturas para a viabilização do acesso a esse recurso, e a necessidade do estabelecimento de um regime tarifário social que possibilite o acesso a todos (Borrelli *et al.*, 2020; D'Odorico *et al.*, 2018; Piche; Vivar; Fuentes, 2019).

A utilização de um regime tarifário pelas companhias de saneamento pode ser vista como uma das maneiras utilizadas pelo estado para a limitação do fornecimento desse bem à população. Entretanto, essa afirmação não pode ser interpretada de forma simplificada, visto que, a água é um bem, dotado de valor econômico e deve ter sua regulamentação econômica para a viabilização dos serviços de captação, tratamento e distribuição, garantindo assim, a entrega de água potável às pessoas.

Nesse contexto, o estado deve criar mecanismos de estabelecimento de tarifas distintas, de acordo com as limitações financeiras da sua população, para garantir o direito à acessibilidade e universalidade desse recurso a todos (Bos, 2017; Miranda *et al.*, 2019; ONU, 2015; Reis; Carneiro, 2021; Sousa, 2019).

A gestão dos recursos hídricos realizada de maneira efetiva é uma importante e eficiente ferramenta para a otimização do gerenciamento da água, visando sempre o atendimento das diferentes necessidades como, por exemplo, a garantia do fornecimento do recurso para as diferentes demandas de cada bacia hidrográfica, desta maneira, proporcionando justiça social aos usuários sem deixar de lado a manutenção da preservação dos ecossistemas (Araújo; Oliveira, 2021; Xiang *et al.*, 2021; Zubaidi *et al.*, 2020).

Para tanto, é fundamental a escolha do melhor método de gestão que tenha uma visão global de todo o processo de utilização, reservação e alocação do recurso. Deste modo, uma importante ferramenta de auxílio para escolha do modelo de gestão correto é a realização de estudos prévios para identificação de qual opção é mais viável para o atendimento da oferta e demanda de cada localidade (Bakhshianlamouki *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021; Zeinali; Azari; Heidari, 2020).

3.1.2 Qualidade da água

A qualidade da água dos corpos hídricos vai depender tanto das condições geológicas e geomorfológicas da região, quanto das ações antrópicas (Metcalf; Eddy, 2016). Desta forma,

as principais causas de poluição da água estão ligadas, direta ou indiretamente, ao desenvolvimento humano, como o aumento das atividades industriais, agrícolas, produção de energia e a crescente demanda para uso doméstico (Heller; Pádua, 2010).

Os processos de tratamento convencionais de água tornam-se cada vez menos eficientes em virtude da diversidade e elevação dos níveis de contaminantes lançados nos mananciais, impondo as estações de tratamento de água o uso de técnicas mais avançadas para serem capazes de mitigar o crescente nível de poluição dos mananciais (Camacho, 2011).

A ausência de infraestrutura dos serviços de saneamento básico e a contaminação das águas de drenagem natural por águas residuárias próximas à foz de mananciais ocorrem em diversas partes do mundo, a exemplo de casos no Brasil, com a detecção de contaminação por esteróis fecais e *E.coli* na Baía de Guanabara – RJ; na Nigéria, com a presença de metais pesados na água de abastecimento de escolas secundárias na zona costeira de Badagry; na República Democrata do Congo, com a constatação de altos níveis de contaminação fecal em águas subterrâneas; e em outras diversas regiões do mundo, como evidenciado por Atabati *et al.* (2020) no seu estudo de prevalência de *Entamoeba spp* e outro protozoários em mais de 74 países com a utilização de revisão sistemática e meta-análise (Costa; Pessoa; Carreira, 2018; Kayembe *et al.*, 2018; Oloruntoba; Wada; Adejumo, 2022).

Mais recentemente, trabalhos realizados na África Subsaariana e em países em desenvolvimento, indicam possível transmissão de SARS-CoV-2 por contato com fezes não tratadas, evidenciando mais ainda o efeito resultante da ausência de saneamento (Bogler *et al.*, 2020; Elsamadony *et al.*, 2021; Odih *et al.*, 2020).

Geralmente, a avaliação da qualidade dos recursos hídricos é determinada pela análise de parâmetros individuais, sendo essa uma ótima ferramenta de avaliação. Embora os profissionais entendam prontamente esta linguagem técnica, pessoas comuns têm dificuldade em compreender esses resultados de qualidade da água (Cude, 2001; Klamt, 2021).

Um dos índices mais difundidos no mundo é o Índice de Qualidade da Água (IQA) da National Sanitation Foundation (NSF) desenvolvido por Brown *et al.* (1970), para os Estados Unidos o qual utiliza diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos para caracterizar a qualidade da água. Foi estabelecido com base na seleção de nove variáveis as quais podem ser integradas para descrever, o grau de qualidade em que um corpo d'água se encontra para fins de potabilidade da água (Tyagi *et al.*, 2013; Uddin; Nash; Olbert, 2021). No Brasil o índice foi adaptado por algumas instituições para sua melhor aplicação, como por exemplo pela CETESB (Tabela 1).

Tabela 1 – Indicadores utilizados na composição do IQA e seus pesos

INDICADOR DE QUALIDADE DA ÁGUA	PESO (w)
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
Potencial hidrogeniônico - pH	0,12
DBO _{5,20}	0,10
Temperatura da água	0,10
Nitrogênio total	0,10
Fósforo total	0,10
Turbidez	0,08
Resíduo total	0,08

Fonte: CETESB (2019).

O seu objetivo é não demandar um grande número de parâmetros de qualidade de água, diferentes para seu desenvolvimento e validação, apenas a concentração de um número limitado de indicadores com um resultado significativo. O IQA fornece um único número que expressa a qualidade geral da água com base nos pesos de importância atribuídos a cada indicador de qualidade. Foram definidas cinco classes de qualidade da água: vermelha (muito ruim), laranja (ruim), amarela (média), verde (boa) e azul (excelente) (Tabela 2) (Kachroud *et al.*, 2019).

Tabela 2 – Classificação da água com base nas faixas do IQA

SCORE DO IQA	CLASSES	SIGNIFICADO
90 < IQA ≤ 100	Excelente	Águas apropriadas para tratamento convencional visando o abastecimento público.
70 < IQA ≤ 90	Bom	
50 < IQA ≤ 70	Médio	
25 < IQA ≤ 50	Ruim	Águas impróprias para o tratamento convencional visando o abastecimento público, sendo necessária a utilização de técnicas avançadas.
IQA ≤ 25	Muito Ruim	

Fonte: Moretto *et al.* (2012).

Os IQA's foram desenvolvidos para verificar a qualidade dos corpos d'água e monitorar mudanças espaço-temporais nas características da água, com foco na avaliação da poluição de águas residuárias e processos de eutrofização (Akkoyunlu; Akiner, 2012; Finotti *et al.*, 2015; Klamt *et al.*, 2019).

No Brasil, o índice foi calibrado para as condições de temperaturas locais e regimes lóticos por Moretto *et al.* (2012). Foi utilizado o *software* IQADData para execução dos cálculos

necessários com base nos padrões estipulados na Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CETESB, 2019; CONAMA, 2005; Posselt; Costa; Lobo, 2015).

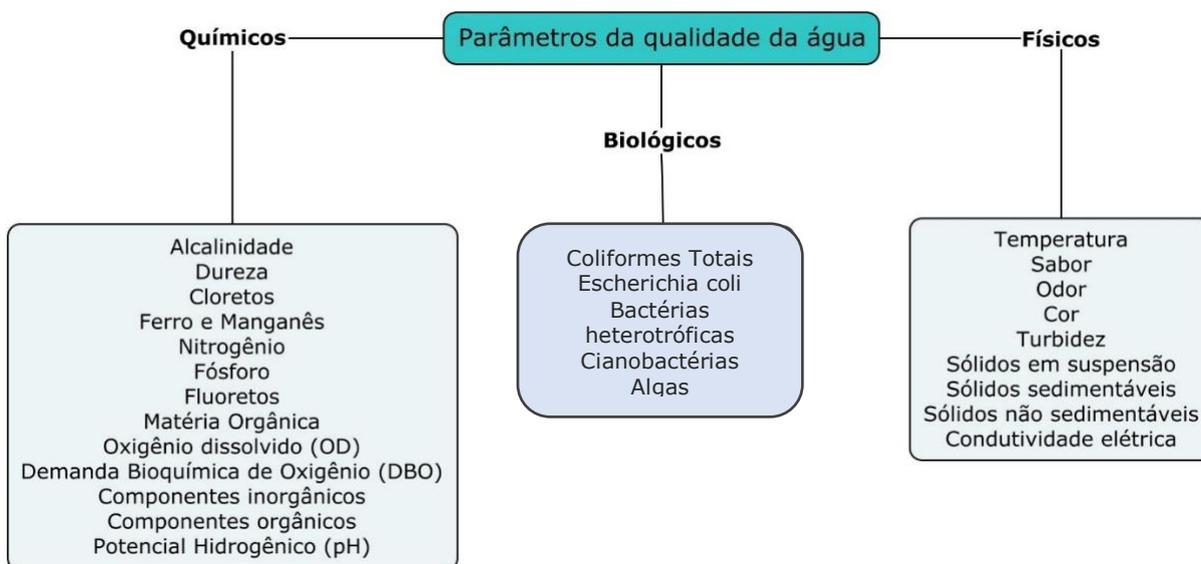
O IQA é baseado na comparação da qualidade da água com seus respectivos padrões regulatórios. A formulação e uso de índices têm sido largamente utilizado pelos órgãos responsáveis pela vigilância e controle do abastecimento e poluição da água, demonstrando o estado de sua qualidade às autoridades de gerenciamento e pessoas não técnicas de forma clara e direta (Glória; Horn; Hilgemann, 2017; Klamt, 2021).

Para determinar a potabilidade da água de abastecimento no mundo desenvolvido, as amostras de água são frequentemente coletadas e analisadas em relação a uma série de padrões físicos, químicos e microbiológicos. A maioria dos padrões de qualidade da água é baseada em parâmetros das diretrizes de saúde da WHO, os quais foram adequados e/ou alterados para atender as características locais. Posteriormente, são adotados pelos governos como os padrões regionais de referência (MBS, 2005; Mukate *et al.*, 2019; WHO, 2017b).

Embora o monitoramento da água de abastecimento seja fundamental para garantia do fornecimento de água potável, ele deve ser realizado com objetivo de maximização da qualidade e quantidade disponível de água, sendo fundamental a manutenção da proteção dos recursos hídricos, visto que, são eles a matéria-prima do processo de abastecimento (Grimason *et al.*, 2013). O monitoramento da qualidade da água potável é um exercício custoso e geralmente só é desempenhado regularmente pelos fornecedores legais de água potável para grandes centros. No entanto, esse acompanhamento regular de pequenos suprimentos de água comunitária, como soluções alternativas de abastecimento em áreas rurais dispersas de países em desenvolvimento, não é de aplicação realista (Malings *et al.*, 2020; Tran; Park; Lee, 2020; WHO, 2010; Zulkifli; Rahim; Lau, 2018).

Toda água destinada ao consumo humano deve obedecer aos padrões de potabilidade, garantindo a segurança do seu uso, sendo assim, são utilizados diversos processos de tratamento, desde da captação da água bruta até a sua destinação final, com o objetivo de entregar uma água potável, no menor prazo e com o melhor custo possível (Brasil, 2021b; Tsaridou; Karabelas, 2021; WHO, 2021). Deste modo, alguns fatores têm que ser levados em consideração quando se fala de tratamento de água, são eles as características químicas, físicas e biológicas que ela apresenta, alguns desses podem ser utilizados como indicadores de qualidade devido a sua grande importância para a adequação da água (Figura 1).

Figura 1 - Principais indicadores da qualidade da água



Fonte: Adaptado de Heller e Pádua (2010); WHO (2017).

Alguns indicadores possuem maior relevância e, por essa razão, interferem na manutenção de outros aspectos de qualidade da água, sendo denominados indicadores sentinelas. Os indicadores físicos da água englobam as percepções imediatas dos sentidos da visão (turbidez e cor), paladar (sabor) e olfato (odor). Sendo assim, são fatores importantes por influenciarem diretamente na aceitação e confiança pela população (Dinka, 2018; Duressa; Assefa, 2019).

As características de natureza química são importantes do ponto de vista sanitário, uma vez que, além de poderem inviabilizar o uso de certas tecnologias em seu tratamento, dependendo dessas características, podem causar danos à saúde de indivíduos sob um longo período de exposição (Cordner *et al.*, 2019; Faust; Aly, 2018).

Finalmente, as características biológicas englobam os diversos microrganismos presentes no ambiente aquático que, além de causarem doenças, ainda participam da degradação da matéria orgânica. Diferentemente da ação dos fatores químicos, a infecção gerada por esses microrganismos patogênicos é de ação rápida (Heller; Pádua, 2010; Libânio, 2010; Wen *et al.*, 2020).

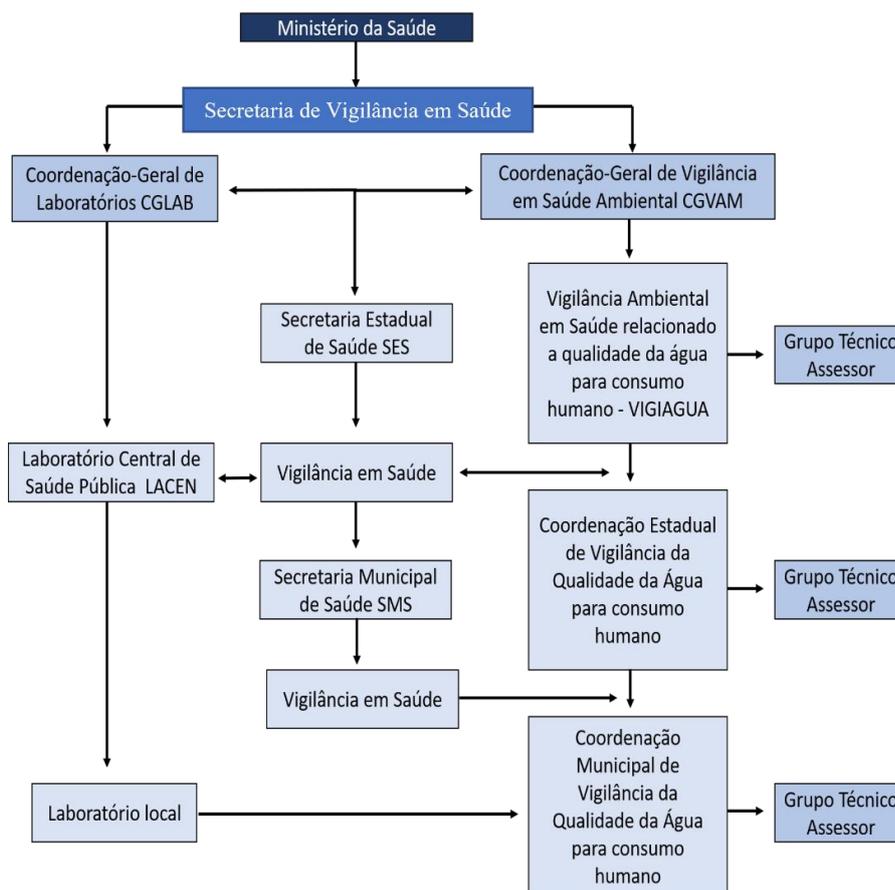
As alterações relacionadas às atividades antrópicas refletem em alterações nos corpos hídricos. Esses efeitos estão ligados a atividades que aceleram a contaminação da água como por exemplo: as atividades agropecuárias, criação de animais, plantações, utilização de fertilizantes mal processados e destinação ilegal de esgotos *in natura* que afetam a qualidade dos mananciais. Um dos efeitos resultantes dessas ações é a elevação do quantitativo de

bactérias, parasitas, vírus e fungos presentes na água (Cai *et al.*, 2021; Mainali; Chang, 2018; Silva *et al.*, 2021).

Com a finalidade de desenvolver atividades de promoção da saúde, propiciando a melhoria da qualidade de vida da população, em 1999 foi iniciada no Brasil a estruturação do Programa VIGIAGUA. A base desse programa está alicerçada na Constituição Federal de 1988, que explicita a obrigatoriedade de se realizar a fiscalização e a inspeção da água potável, e na Lei 8.080, de 1990, que reforça a responsabilidade do setor saúde no que se refere à fiscalização das águas destinadas ao uso humano (Oliveira *et al.*, 2019). Esse programa visa desenvolver ações de vigilância da qualidade da água para consumo humano que garantam à população acesso à água em quantidade suficiente e qualidade compatível com o padrão de potabilidade estabelecido na norma brasileira, para promoção da saúde (Fortes; Barrocas; Kligerman, 2019).

O Programa VIGIAGUA estabelece atribuições ao setor saúde, por meio da realização de ações básicas e estratégicas nas três esferas governamentais, de acordo com os princípios norteadores do Sistema Único de Saúde (SUS), como melhor explicado na Figura 2.

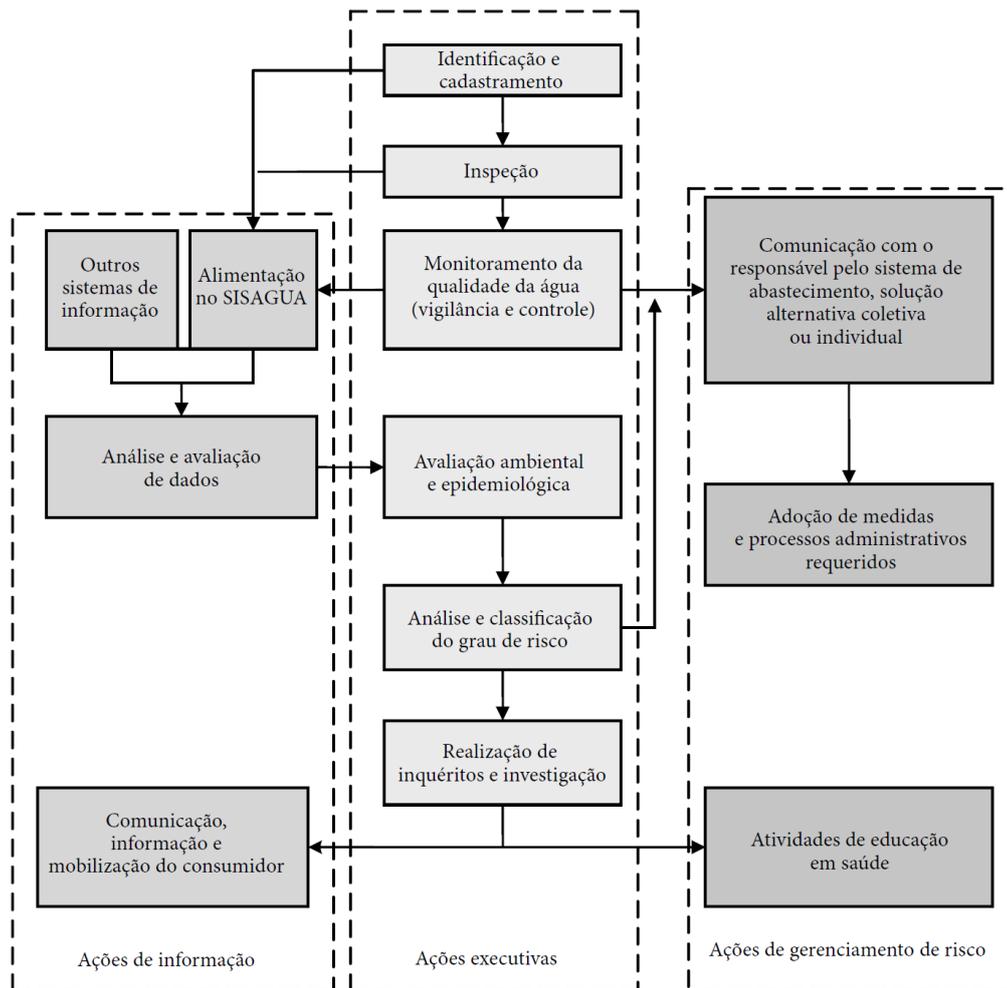
Figura 2 – Organização institucional do Programa de Vigilância em Saúde Ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano



Fonte: Brasil (2006).

A atuação do VIGIAGUA ocorre em todas as formas de abastecimento de água, seja na área urbana ou rural, de gestão pública ou privada, inclusive em comunidades isoladas. O programa consiste em um conjunto de ações básicas adotadas continuamente pelas autoridades de saúde pública, com o objetivo de fortalecer a vigilância e controle, garantindo assim, o acesso à água potável e em quantidades suficientes à população, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Ações básicas para operacionalização da vigilância da qualidade da água potável no Brasil



Fonte: Adaptado de BRASIL (2006).

3.1.3 Impacto da ausência do saneamento na saúde pública

A água é, sabidamente, um limitante para o desenvolvimento das populações, sendo de amplo conhecimento o seu papel relevante na proliferação e agravamento de patologias,

principalmente em localidades vulneráveis, como por exemplo nos países em desenvolvimento como o Brasil (Rodrigues *et al.*, 2022).

Ainda que a presença de microrganismos nas águas não se limite a uma região específica do mundo ou ao seu nível de desenvolvimento, à falta de saneamento, más condições de distribuição e ausência de água, o pouco investimento financeiro dos estados para garantir a distribuição de água potável para toda a população, o descontrole dos surtos e a falta de intervenção dos sistemas públicos de saúde, favorecem a disseminação, incidência e morbimortalidade associada às doenças de veiculação hídricas (Rios-Tobón; Agudelo-Cadavid; Gutiérrez-Builes, 2017). Estima-se que 4% das mortes no mundo são causadas por doenças de veiculação hídricas (WHO, 2017a).

As principais doenças relacionadas à transmissão direta pela água, por meio da ingestão ou contato (ou penetração na pele) com ela são: cólera, febres tifoide e paratifoide, shigelose, amebíase, diarreia e gastroenterite de origem infecciosa presumível, outras doenças infecciosas intestinais, esquistossomose (Classificação Internacional de Doenças, 10a revisão – CID-10) (Paiva; Souza, 2018).

De acordo com um estudo desenvolvido pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES, 2021), estima-se que no Brasil, cerca de 40 mil internações foram realizadas no primeiro trimestre de 2020, como consequência direta da falta de saneamento básico, que resultou em um custo para os cofres públicos de aproximadamente 16 milhões de reais. Esses números aumentaram em 2023 como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Indicadores de saúde para doenças infecto-parasitárias e relacionadas à poluição hídrica no Brasil e suas regiões, no ano de 2023

	Doenças infecto-parasitárias (DIP)			Doenças relacionadas à poluição hídrica		
	Taxa de internação em relação a 100mil hab	Proporção de internações em relação ao total (%)	Proporção de gastos em relação à verba total	Taxa de internação em relação a 100mil hab	Proporção de internações em relação ao total (%)	Proporção de gastos em relação à verba total
Brasil	329,06	5,88	8,19	58,7	1,05	0,31
Norte	436,9	7,53	8,64	132,08	2,27	0,75
Nordeste	395,5	6,87	8,27	102,9	1,78	0,55
Sul	388,4	5,48	7,41	46,1	0,65	0,17
Sudeste	291,7	5,2	8,57	27,3	0,49	0,18
Centro-oeste	309,01	5,12	7,47	60,5	1,00	0,31

Fonte: Data SUS (2023).

Os dados mostram que cerca de 8% da verba do SUS são gastos com doença infecciosa e parasitária (DIP) e doenças relacionadas à poluição hídrica no âmbito nacional. Essa relação se agrava nas regiões Norte e Nordeste, onde são gastos, respectivamente, 8,64% e 8,27% do total da verba destinada a saúde para o tratamento dessas patologias.

Esse é um difícil cenário que acaba elevando os índices de morbimortalidade da população em geral, com agravamento na faixa etária infantil (Paiva; Souza, 2018). Assim, o acesso à água potável, seja ela usada para ingestão, fins domésticos ou produção de alimentos, tem um papel fundamental sobre a saúde pública de uma população.

3.1.4 Distribuição hídrica no Brasil

O Brasil, sem dúvida, é um dos países que mais detém disponibilidade hídrica perfazendo, 11% da água doce disponível no mundo. Entretanto, essa questão é mais complexa do que se apresenta, devido a uma série de fatores, dentre eles: a distribuição desses recursos no território nacional; os ciclos climáticos regionais e a distribuição populacional no território do país. O cenário atual demonstra uma difícil realidade em diversas regiões do país, revelando-se, de fato, como um grande desafio de gestão de recursos hídricos para a garantia de água em quantidade e qualidade necessárias aos cidadãos (Tabela 4).

Tabela 4 – Disponibilidade hídrica nos estados do Brasil

Situação Hídrica (m ³ /hab.ano)	Estados Brasileiros	Disponibilidade hídrica percapita (m ³ /hab.ano)
Abundância > 20.000	Roraima	1.747.010
	Amazonas	878.929
	Amapá	678.929
	Acre	369.305
	Mato Grosso	258.242
	Pará	217.058
	Tocantins	137.666
	Rondônia	132.818
	Goiás	39.185
	Mato Grosso do Sul	39.185
Muito rico > 10.000	Rio Grande do Sul	20.798
	Maranhão	17.184
	Santa Catarina	13.662
	Paraná	13.431
	Minas Gerais	12.325

Continua

Continuação

Situação Hídrica (m³/hab.ano)	Estados Brasileiros	Disponibilidade hídrica percapita (m³/hab.ano)
Rico > 5.000	Piauí	9.608
	Espirito Santo	7.235
Situação correta > 2.500	Bahia	3.028
	São Paulo	2.913
Pobre < 2.500	Ceará	2.436
	Rio de Janeiro	2.315
	Rio Grande do Norte	1.781
	Distrito Federal	1.752
	Alagoas	1.751
	Sergipe	1.743
Situação crítica < 1.500	Paraíba	1.437
	Pernambuco	1.320

Fonte: SNIS (2021b).

3.1.5 Marcos regulatórios

A partir do final do Século XIX e início do Século XX, diversas legislações foram elaboradas buscando estabelecer critérios para análise da qualidade da água no Brasil. O Decreto Federal nº 79.367/1978 estabelece a competência do Ministério da Saúde sobre a definição do padrão de potabilidade da água de consumo humano, a ser observado em todo o território nacional brasileiro. Esse decreto ficou conhecido como a primeira norma de potabilidade de água no Brasil (Bittencourt; Pereira, 2013).

É importante relacionar algumas das principais resoluções sobre o tema no Brasil, dentre elas podem ser destacadas a Resolução nº357/2005 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que estabelece a classificação e a proteção das águas dos mananciais superficiais, a Resolução CONAMA nº396/2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, como também a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, que dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância de qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021b). A evolução da legislação federal no que tange o saneamento no Brasil está citada na Tabela 5.

Tabela 5 – Evolução das legislações federais acerca do saneamento

Lei	Descrição
Lei N° 5.318/1967	Institui a Política Nacional de Saneamento e cria o Conselho Nacional de Saneamento.
Constituição Federal de 1988	Assegura o exercício dos direitos sociais e individuais, a liberdade, a segurança, o bem-estar, o desenvolvimento, a igualdade e a justiça.
Lei N° 8.987/1995	Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências.
Lei N° 9.074/1995	Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências.
Lei N° 9.605/1998	Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
Lei N° 10.257/2001	Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
Lei N° 11.107/2005	Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências.
Projeto de Lei N° 7.361/2006	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências.
Lei N° 11.445/2007	Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico.
Lei N° 12.305/2010	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Lei N° 13.089/2015	Institui o Estatuto da Metr�pole, altera a Lei no 10.257, de 10 de julho de 2001, e dá outras providências
Decreto N° 5.440/2005	Estabelece definições e procedimentos sobre o controle de qualidade da água de sistemas de abastecimento e institui mecanismos e instrumentos para divulga�o de informa�o.
Decreto N° 7.217/2007	Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências.
Lei N° 14026/2020	Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei n� 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir � Agência Nacional de �guas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento.

Fonte: Costa Filho (2020)

Desse modo para viabilizar a aplica o das leis, foram editadas portarias e resolu es visando regulamentar e instrumentalizar as quest es relativas ao saneamento no pa s, sempre com o cuidado para a manuten o das diretrizes dadas pela Constitui o Federal do Brasil de 1988 (Tabela 6). Com todo esse arcabou o jur dico, o Brasil   conhecido internacionalmente por possuir uma legisla o forte e moderna nessa  rea. Entretanto, os  rg os fiscalizadores da

lei enfrentam grandes dificuldades para aplicá-las, devido a uma série de fatores, como: baixo nível orçamentário, falta de pessoal, dificuldade de deslocamento para regiões isoladas e lentidão do sistema judiciário nacional (Daronco, 2013; Ramos, 2018).

Tabela 6 – Apanhado das legislações e normativas federais mais recentes e relevantes no âmbito do saneamento relacionado com a água, tanto natural como para consumo

Legislação	Descrição
Portaria de Consolidação N° 5/2017 – Anexo XX	Dispõe sobre o Controle e a Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade.
Portaria N° 888/2021	Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
Resolução CONAMA N° 01/1986	Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impactos ambientais.
Resolução CONAMA N° 05/1988	Dispõe sobre o licenciamento de obras de saneamento.
Resolução CONAMA N° 237/1997	Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental.
Resolução CONAMA N° 357/2005	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, e dá outras providências.
Resolução CONAMA N° 369/2006	Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em área de Preservação Permanente - APP.
Resolução CONAMA N° 375/2006	Dispõe critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.
Resolução CONAMA N° 377/2006	Dispõe sobre licenciamento ambiental simplificado de Sistema de Esgotamento Sanitário.
Resolução CONAMA N° 430/2011	Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357.

Fonte: Costa Filho (2020).

3.2 Soluções alternativas de abastecimento

A Portaria MG/MS n° 888, de 04 de maio de 2021, define em seu Capítulo II, no Art. 5°, Inciso § V à VII:

V- Sistema de abastecimento de água (SAA) para consumo humano: instalação composta por um conjunto de obras civis, materiais e

equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais, destinada à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição;

VI- Solução alternativa coletiva (SAC) de abastecimento de água para consumo humano: modalidade de abastecimento coletivo destinada a fornecer água potável, com captação subterrânea ou superficial, com ou sem canalização e sem rede de distribuição;

VII- Solução alternativa individual (SAI) de abastecimento de água para consumo humano: modalidade de abastecimento de água para consumo humano que atenda a domicílios residenciais com uma única família, incluindo seus agregados familiares (BRASIL, 2021b, p. 2).

A interrupção do fornecimento ou deterioração da qualidade da água potável, geralmente, tem um impacto substancial nos resultados de qualidade de vida das pessoas. As cisternas rurais, veículos transportadores de água (caminhão-pipa), reservatórios (barragens, açudes e lagos), se apresentam como importantes soluções alternativas para essas regiões, no entanto cuidados devem ser adotados para manter a qualidade da água reservada (Ayed *et al.*, 2018).

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, as soluções alternativas de abastecimento de água para consumo humano diferenciam-se dos sistemas de abastecimento tradicional por não apresentarem rede de distribuição (instalação composta por conjunto de obras civis destinadas à distribuição canalizada da água potável), podendo ser coletivos (SAC) ou individuais (SAI) (Brasil, 2021b). Alguns exemplos de soluções alternativas são ilustrados na Figura 4.

Figura 4 - Exemplos de soluções alternativas de abastecimento de água para consumo humano



Fonte: Adaptado de Heller; Pádua (2010).

Uma vez que a região semiárida nordestina apresenta uma grande escassez hídrica, esses sistemas de abastecimento alternativos, como é o exemplo da construção de cisternas, se tornam uma solução para um melhor convívio com a seca. Essa milenar técnica de armazenamento de água de chuva, passou a ser utilizada no Brasil a partir da década de 1950 como uma ação contra a seca, desenvolvida pelo Governo Federal (Gomes; Heller, 2016; Marengo *et al.*, 2018). Em 2001, os órgãos governamentais, em conjunto, criaram o Programa de Formação e Mobilização Social para a Convivência com o Semiárido: Um milhão de Cisternas Rurais – PIMC, buscando construir um milhão de cisternas em cinco anos (Ferreira, 2008; Passador; Passador, 2010).

O objetivo dessa tecnologia é armazenar a água de chuva e/ou de outras fontes de abastecimento e promover, muitas vezes, uma solução unitária para a subsistência dessas populações. É importante destacar que não basta a criação dessas técnicas de reservação, os reservatórios precisam ser limpos periodicamente e mantidos tampados para evitar contaminação biótica e abiótica (Heller; Pádua, 2010; Silva *et al.*, 2020a), caso contrário, esse valioso meio passa a se tornar um problema de saúde pública.

Além da captação de água de chuva, o abastecimento das cisternas também pode ocorrer por meio de caminhões-pipa (Silva *et al.*, 2020b). Um programa bem difundido, atualmente, é a Operação Carro-pipa, que atende cerca de 4 milhões de pessoas na região Nordeste. Em Campina Grande-PB, só o 31°BIMtz atende 26 municípios das regiões circunvizinhas (BRASIL, 2017a). A Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde estabelece as diretrizes de qualidade para que a água seja própria para consumo humano, seja ela distribuída por sistema convencional de abastecimento ou soluções alternativas de abastecimento (Brasil, 2021b).

3.3 Abastecimento de água no meio rural

Atualmente, não existe uma definição universal consagrada para o termo “rural”. Na maioria dos casos, prevalecem classificações de natureza dicotômica (com o termo urbano), nas quais rural corresponde a “residual”, ou definida simplesmente, como o que não é urbano, sem fazer referência às suas características próprias (Abramovay, 2009). A adoção de critérios da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) define como rural um patamar de 150 habitantes por quilômetro quadrado e as distâncias até um centro povoado (Dirven *et al.*, 2011).

Os sistemas de abastecimento têm sido avaliados quanto a degradação da qualidade da água e suas possíveis contaminações. As contaminações oriundas dos sistemas de distribuição de água são resultantes de falhas nos processos de captação, tratamento, reservação e

distribuição, nos quais, devem ser avaliados os riscos desses problemas para implementação das correções necessárias (Nascimento *et al.*, 2016).

Os sistemas convencionais de abastecimento são amplamente utilizados no Brasil para o fornecimento regular de água em centros urbanos, entretanto, essa realidade não é análoga nas regiões rurais do país. Essas localidades têm graves problemas quanto ao fornecimento de água em quantidade e qualidades para os seus usuários, visto que a implementação de sistemas convencionais de abastecimento, muitas vezes, é inviabilizada nessas regiões devido a uma série de fatores, como: grandes distâncias entre as unidades consumidoras, baixo adensamento populacional e baixas demandas, se comparados com localidades urbanas, resultando na inviabilidade econômica para a prestação do serviço pelas companhias de saneamento (Carvalho *et al.*, 2022; Machado *et al.*, 2023).

Diante desse cenário, as comunidades rurais ficam normalmente desprovidas de um sistema de abastecimento regular que possa lhes dar segurança quanto ao abastecimento de água. Desse modo, a técnica mais empregada é a utilização de soluções alternativas de abastecimento, sendo essas, muitas vezes, relacionadas a casos de contaminação, os quais são resultantes de uma série de problemas, como: falta de padronização, ausência de sistemas de monitoramento e utilização de técnicas rudimentares.

Quanto ao cenário atual do saneamento no meio rural, os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) demonstram que ainda são intensas as desigualdades no acesso aos serviços de abastecimento de água entre os habitantes das áreas urbanas e rurais (IBGE, 2023). Ainda segundo o PNAD, cerca de 9% (ou 6,4 milhões) dos domicílios do país que tinham a rede geral como principal forma de abastecimento de água não dispunha de fornecimento diário de água, e 3,6 milhões desses domicílios estavam na região Nordeste.

Segundo Lucena (2018), no Brasil, 33,4% dos domicílios rurais estavam ligados à rede de distribuição de água (com ou sem canalização interna), sendo que o restante (66,6% das residências) utilizava soluções alternativas coletivas ou individual de abastecimento, como o uso de captação direta de água da chuva, coleta em reservatórios superficiais (açudes e lagos) sem tratamento, poços e a coleta direta em nascentes de rios. Entretanto, esses dados retrocederam em 2022, segundo IBGE (2023) apenas 32% das residências estavam conectados à rede geral de água, uma diminuição de 1,4%.

Segundo a WHO, o acesso à água é fundamental para a manutenção da saúde e bem-estar das pessoas, devendo seu fornecimento ser ininterrupto e com a qualidade requerida para preservação dos hábitos higiênicos mais básicos. O acesso pode ser definido como a capacidade de alcançar o fornecimento de água a uma distância máxima de 1 km ou em até 30 minutos,

podendo fornecer um mínimo de 20 litros por habitante, por dia, entretanto é recomendável um fornecimento diário de 50 a 100 litros de água por pessoa para que esse alcance seja satisfatório (Silva, 2019).

3.3.1 Gestão de água segura para populações dispersas na área rural

A gestão de sistemas e soluções alternativas de abastecimento de água em meio rural envolve muitos aspectos, tais como organização da gestão, sistema operacional e fundos operacionais (Oyebode; Muzammil, 2019). A avaliação da eficácia da operação e gerenciamento sustentável da água rural chamou a atenção de muitos pesquisadores, devido a sua grande diferença aos sistemas convencionais de abastecimento das áreas urbanas.

Uma das ferramentas mais utilizadas pelos pesquisadores para viabilizar o gerenciamento, é a aplicação de um sistema de indicadores, considerando diferentes aspectos da operação do projeto. Os quais pode-se citar, o modelo de avaliação de agrupamento cinza, utilizado na China (Zhang; Fan, 2013), o processo de hierarquia analítica *Fuzzy-Analytical Hierarchy Process* (AHP), na Índia (Lin, 2020; Singh; Sarkar, 2019), técnica de preferência de ordem por semelhança com uma solução ideal (TOPSIS), no Irã (Komasi; Sharghi, 2017; Meshram *et al.*, 2020), o modelo de equação estrutural (SEM), na Indonésia (Masduqi *et al.* 2010), entre outros estudos pelo mundo. Entretanto, os resultados dos diferentes métodos de avaliação são muitas vezes inconsistentes, devido à aplicabilidade e estabilidade dos próprios métodos de avaliação individual.

Com o objetivo de ampliar o controle da qualidade da água em sistemas e soluções alternativas e individuais de abastecimento, ao mesmo tempo em que buscava implantar o plano de segurança da água em áreas rurais, foi elaborado o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), com o objetivo de facilitar o acesso a infraestruturas de saneamento básico nas comunidades rurais dispersas, populações essas muitas vezes carentes de serviços básicos, abrangendo o fornecimento de água potável (Brasil, 2019).

O PNSR fornece bases para planejamento e gestão dos serviços que determinam saúde e qualidade de vida no Brasil e, além de buscar o controle e monitoramento de fontes abastecedoras, visa assegurar as condições sanitárias da infraestrutura rural (Corrêa; Ventura, 2021). Esse programa fornece como estrutura uma conexão e promoção de iniciativas integradas e sustentáveis de saneamento rural, com o objetivo de valorizar e incrementar o patrimônio consolidado pelos potenciais parceiros e comunidades contempladas (Brasil, 2019; Corrêa; Ventura, 2021).

Além do PNSR, outros programas estaduais e municipais foram criados no âmbito estadual, como o ProRural (Companhia Espírito Santense de Saneamento - CESAN - Espírito Santo) e o SISAR (Sistema integrado de saneamento rural - Ceará). Segundo Sousa; Sousa; Henriques (2022, p. 59), o programa ProRural foi criado em 1991, estabelecido pelo CESAN, tendo como objetivo geral “implantar sistemas de saneamento básico em comunidades normalmente localizadas em áreas geograficamente isoladas (população de 50 – 1500 habitantes), nos quais a companhia possui concessão (preferencialmente), onde não há viabilidade econômica para operação/manutenção pela companhia”.

O SISAR, é uma organização da sociedade civil sem fins econômicos criado em 1996 pelas associações das comunidades beneficiadas com o sistema de abastecimento de água ou esgoto sanitário filiado e localizado na mesma bacia hidrográfica. Tem como objetivo facilitar o desenvolvimento e manutenção dos sistemas implantados pela CAGECE de forma autossustentável. Atualmente, o sistema atua em 164 municípios do Ceará, atendendo mais de 1.045.580 pessoas, mediante 190 mil ligações de água, e já existem 354 estações de tratamento e 690 poços operados pelo SISAR (Sisar, 2024).

Sistemas distintos de indicadores focam em diversos aspectos da operação e gestão de projetos de abastecimento de água rural. Os métodos de avaliação individual são a maioria das pesquisas existentes, tendo como objetivo principal analisar a operação dos projetos de abastecimento de água em zona rural.

Esses modelos são aplicados pelo mundo como, Zhang (2018) que estabeleceu um sistema de indicadores para avaliar o desempenho da operação sustentável e da gestão de projetos de segurança da água potável rural a partir dos aspectos de gestão, segurança, organização, economia, sustentabilidade e satisfação. Bem como, Deng *et al.* (2017) que desenvolveram um sistema de indicadores de avaliação da gestão da operação de projetos de abastecimento de água rural centralizado a partir dos aspectos de produção de água, serviço de abastecimento de água, financiamento da operação e gestão da organização.

Essas metodologias são amplamente utilizadas em diversas localidades em todo o planeta, atendendo as mais diversas particularidades. Entretanto, seria mais adequado estabelecer um sistema de indicadores mais abrangente, incluindo os aspectos da operação e gestão de projetos de abastecimento de água rural, para que a situação da operação do projeto possa ser melhor avaliada, de forma direta e simples, atendendo assim, os anseios dessas regiões.

Nesse contexto, surge a ideia de que os modelos de gestão comunitária poderiam ajudar a incrementar o acesso aos serviços de abastecimento de água potável e de esgotamento

sanitário. Esta modalidade tem sido utilizada e promovida pelas agências internacionais, na implementação de outras políticas para a redução de pobreza, como saúde e educação, com a finalidade de garantir, de maneira sustentável, os benefícios à população pobre (Awortwi, 2013; Kleemeier, 2000). Não obstante, segundo McGranahan; Mulenga (2009) este tipo de abordagem é ignorada por diferentes razões, entre elas, a falta de impacto (sejam positivos ou negativos) nos interesses particulares existentes dentro do setor de saneamento e a pouca atenção que atrai fora deste.

Contudo, percebe-se que a solução comumente utilizada para realizar a ampliação dos serviços de abastecimento de água nas áreas rurais dos países em desenvolvimento da África, da Ásia e da América latina, tem sido a gestão comunitária (Machado *et al.*, 2019; Maryati; Firman; Humaira, 2022; Tantoh; Mckay, 2020). Dentre os casos estudados, observam-se alguns mais exitosos que outros, nos quais, quase sempre se deixa a responsabilidade da administração, operação e manutenção dos sistemas, sejam estes coletivos ou individuais, para os próprios usuários (Pineda, 2013; Raid *et al.*, 2022).

O paradigma dos sistemas de abastecimento de água potável em áreas rurais, com participação da população, está baseado na dinâmica do típico ciclo de projeto para abastecimento de água, onde a participação da população se insere nas diversas etapas, como elemento determinante da futura sustentabilidade do sistema. O ciclo divide-se em quatro etapas: identificação do projeto e planejamento prévio; concepção do projeto; implantação; administração, operação e manutenção (Angoua *et al.*, 2018; Miller, 1979; Roland; Heller; Rezende, 2022).

Os agentes externos têm um papel importante, sejam estas autoridades locais, regionais, nacionais ou organizações internacionais, já que podem incidir ou apoiar os moradores de diferentes formas. As ações dos agentes externos podem estar voltadas à conscientização da população, com respeito aos impactos positivos gerados pelo acesso a uma fonte melhorada de água; à capacitação sobre temas de utilidade para o gerenciamento dos sistemas, relacionados com aspectos técnicos, legais e, inclusive, a disponibilização de informações sobre projetos exitosos, promovendo o intercâmbio de experiências com outras comunidades; e à cooperação técnica, mediante desenhos simples (pacotes de sistemas de água aplicáveis ao tipo de situação em estudo) ou assistência técnica de engenheiros e funcionários de saúde (Miller, 1979; Silva, 2022). Constatou-se que esta última atividade é a mais comum, sendo uma característica encontrada em todos os estudos consultados.

Um dos modelos que vem ganhando mais força no Brasil e no mundo é o Sistema de informação de água e saneamento rural (SIASAR), uma ferramenta informativa, desenvolvida

por uma iniciativa conjunta dos governos de Honduras, Nicarágua e Panamá (Siasar, 2012). Esta ferramenta permite a identificação de lacunas e falhas capazes de levar à ruptura dos sistemas hídricos, e a quantificação dos diferentes elementos que influenciam a sua sustentabilidade (Albano; Malheiros, 2021; Rabelo *et al.*, 2022).

O modelo tem indicadores que refletem seu desempenho. Assim, quatro atores são avaliados individualmente por meio de questionários específicos da seguinte forma SIASAR (2016):

- Prestador de assistência técnica: Entidade pública ou privada responsável por oferecer suporte técnico ao prestador de serviço;
- Prestador de serviço: Entidade responsável pela prestação do serviço de água aos usuários;
- Comunidade: Assentamento rural composto por usuários do serviço de água;
- Sistema de água: A infraestrutura do sistema de abastecimento de água, composta por estrutura de captação, estação de tratamento de água e sistema de distribuição.

A vulnerabilidade das comunidades rurais é intensificada por sua fraca capacidade de resposta em termos de pobreza, falta de infraestrutura, bem como, a dependência excessiva de recursos sensíveis ao clima. Em muitos países em desenvolvimento, o abastecimento de água é insuficiente para atender às exigências da sociedade, frente a baixa disponibilidade hídrica de algumas regiões, agravada pelos impactos das mudanças climáticas.

Globalmente, espera-se que o ciclo da água passe por mudanças bem significativas como resultado dos impactos da mudança climática (Tabari, 2020). De acordo com Klare (2020), as mudanças climáticas afetaram negativamente os sistemas de abastecimento de água já existentes, de modo que nos países em desenvolvimento a dificuldade aumentará para a universalização do abastecimento. Os estudos de Patrick (2020) e Zubaidi *et al.* (2020), apontam que as variações dos padrões climáticos têm efeitos adversos mais significativas em comunidades locais, pela sua falta ou pouca estrutura para enfrentar essas adversidades.

Além disso, há evidências regionais de estações secas mais severas, predominantemente, em latitudes sub à extratropicais incluindo a América do Sul e Central, África, Ásia e Oceania (Padrón *et al.*, 2020), que, por sua vez, resultarão em impacto sobre a disponibilidade de recursos hídricos (Tabari, 2020). O impacto direto das atividades humanas sobre os recursos hídricos através da captação de água, irrigação e mudança no uso da terra já é um componente significativo da mudança regional no ciclo da água em especial em zonas rurais agrícolas, as quais, espera-se que aumente ainda mais na medida em que a demanda de água cresce com a população global (Koutsoyiannis, 2020).

Segundo McGranahan; Mulenga (2009), existe um consenso sobre a necessidade de reduzir a taxa da população mundial sem acesso à água potável e ao esgotamento sanitário adequado, mas não sobre como realizá-lo. Com o intuito de melhorar os serviços fornecidos, ampliar o atendimento à população mais pobre e liberar recursos para o investimento no setor, recorre-se a diferentes soluções, entre elas a inclusão da iniciativa privada (Albano; Malheiros, 2021).

Não obstante, os modelos utilizados para fornecimento dos serviços de abastecimento de água potável, sejam estes públicos, privados ou parcerias público-privadas, ainda não apresentam uma solução que permita a universalização do serviço nas áreas rurais ou para as populações consideradas de baixa renda, residentes nas periferias das cidades (Brinks; Singh; Wilson, 2022; Ferreira *et al.*, 2021).

A vida no campo oferece menores oportunidades de desenvolvimento ao indivíduo e a oferta de água segura e de qualidade um dos principais pontos de dificuldade, sendo necessário o investimento em inovação na área para balancear as suas desigualdades (Steiner; Calo; Shucksmith, 2023; Tajima *et al.*, 2022).

Segundo Schmitt; Tahim; Tavares (2020), o Governo Federal, consciente do problema, desenvolveu programas que podem ser vistos como uma parte da solução para a falta de água. Uma iniciativa é o programa “Água para Todos”, que integra o “Plano Brasil Sem Miséria” e o Programa “Água Doce” do Ministério do Desenvolvimento Regional. O programa tem como objetivo garantir o acesso à água às populações rurais dispersas e em situação de extrema pobreza, por meio, dentre outras ações, da instalação de sistemas de captação de água de chuva (SCAC) utilizando cisternas de polietileno. Esses equipamentos armazenam até 16 mil litros de água, captada por meio de calhas, instaladas nos telhados das casas nos períodos de chuva, e são capazes de abastecer uma família de cinco pessoas por até seis meses. Técnica simples e milenar, mas de suma importância para a manutenção do fornecimento de água a população, principalmente na região do semiárido do Brasil (Brasil, 2019).

É relevante ressaltar que a inovação não se restringe à alta tecnologia, é algo novo ou original feito pelo homem e nunca antes experimentado (pelo menos no registro histórico) por uma determinada sociedade. A inovação não precisa necessariamente avançar a base do conhecimento científico. Para muitos países, em especial os menos desenvolvidos, as inovações de baixa tecnologia são estabelecidas não para avançar o conhecimento científico, mas para permitir que os membros da sociedade possam se adaptar melhor ao seu ambiente e aumentar suas qualidades de vida (Lee; Lee; Garrett, 2019; Mazzucato, 2018; Ruediger, 2018).

Dessa forma, com relação aos aspectos de inovações de baixa tecnologia, o governo trouxe um novo conceito para o problema da seca, quando introduziu um novo modelo de cisterna (polietileno) que pode ser facilmente montada, padronizada e produzida em larga escala, permitindo o fornecimento de peças e distribuição em todo Semiárido (Schmitt; Tahim; Tavares, 2020). Entretanto, cabe ressaltar que a implementação das cisternas de polietileno foi concebida como uma ação emergencial diante da seca que acometia a região Nordeste. Além disso, tratava-se de uma política pública verticalizada e implantada em uma perspectiva *top-down* (de cima para baixo) (Santos, 2019).

A inovação no setor público é conceituada por diversos autores, entre eles Mulgan (2017) e Blocha; Bugged (2013) como, de modo geral, tratam da criação e da implementação de novos processos, produtos e serviços, assim como novos métodos e técnicas de prestação de serviços públicos que possam resultar em melhorias significativas em termos de eficiência, efetividade e qualidade.

3.4 Plano de Segurança da Água (PSA)

A garantia da qualidade da água para consumo humano é uma preocupação global, especialmente em regiões onde a escassez hídrica e a falta de saneamento básico são problemas recorrentes (Maia, 2018). Embora haja uma preocupação em relação à conformidade com os padrões estabelecidos pelas legislações nacionais e internacionais, observa-se a persistência de numerosos surtos decorrentes da inadequada qualidade da água em diversas regiões do mundo. Nesse contexto, iniciativas destinadas à avaliação e gerenciamento de riscos, designadas pela WHO como o Plano de Segurança da Água (PSA), têm sido implementadas (Isenburg; Pinto, 2024).

O Plano de Segurança da Água é um instrumento de avaliação e gestão de riscos com abordagem preventiva, que busca garantir a segurança hídrica, reduzindo os riscos de contaminação e melhorando a qualidade da água para consumo humano. Seus objetivos específicos visam prevenir ou minimizar a contaminação dos mananciais de captação, eliminar a contaminação da água por meio do processo de tratamento adequado e, por fim, prevenir a (re)contaminação no sistema de distribuição da água. Além disso, tem como finalidade auxiliar os responsáveis pelo abastecimento de água na identificação e priorização de perigos e riscos em sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água, desde o manancial até o consumidor (Brasil, 2012; WHO, 2017b).

Esses objetivos são aplicados nos sistemas de grande e pequeno porte, os quais podem ser alcançados por meio de:

- i) Conhecimento adequado do sistema de abastecimento de água e da sua capacidade de fornecer água de boa qualidade que satisfaça as metas de saúde;
- ii) identificação das fontes potenciais de contaminação e seu controle;
- iii) implementação de um sistema de monitoramento das medidas de controle dentro do sistema de abastecimento;
- iv) implementação das ações corretivas, visando assegurar que a água fornecida seja mantida com uma qualidade constante;
- v) validação e verificação da implementação do PSA, de forma que as metas de saúde sejam alcançadas (Junior *et al.*, 2020, p. 197).

No âmbito nacional brasileiro, a responsabilidade pela elaboração das normas e padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano é atribuída ao Ministério da Saúde, conforme estabelecido pelo Decreto Federal n.º 79.367, datado de 09 de março de 1977. Atualmente, a Portaria nº 888, emitida pelo Ministério da Saúde em 2021, representa um marco importante ao estabelecer procedimentos e responsabilidades relacionados ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano, bem como seu padrão de potabilidade. Essa legislação adota uma abordagem proativa de gestão preventiva, centrada no enfoque de risco à saúde, exigindo a obtenção de uma série de informações para a realização de uma avaliação completa do risco à saúde das populações. Ao adotar uma perspectiva de gestão baseada em riscos à saúde, busca promover a segurança da água para consumo humano em todo o território nacional. Isso implica não apenas em estabelecer padrões de potabilidade, mas também em garantir a implementação de medidas preventivas e corretivas adequadas para mitigar os riscos associados à contaminação da água (Junior *et al.*, 2020).

Assim, com a finalidade de assegurar o fornecimento de água segura e potável, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a Norma ABNT NBR 17080:2023 “Plano de segurança da água: Princípios e diretrizes para elaboração e implementação”. A norma é aplicável para os sistemas de abastecimento de água para consumo humano, bem como para as soluções alternativas de abastecimento de água para consumo humano, operados por prestadores de serviços de água tanto públicos como privados (ABNT, 2023).

A concepção do PSA fundamenta-se em grande parte nos princípios e conceitos de outras metodologias de gerenciamento de risco, notadamente nos Princípios de Múltiplas Barreiras (visando prevenir, reduzir ou eliminar a contaminação, através da avaliação sistemática da bacia contribuinte, histórico das águas, características do sistema e práticas operacionais); nas Boas Práticas (medidas de controle que visam garantir a eficácia de cada barreira para prevenir riscos à saúde humana, sendo aplicadas desde a concepção até a operação

e manutenção de sistemas de abastecimento de água); no Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) (método sistemático para identificar e controlar riscos que possam afetar a segurança da água) e; na Análise de Risco (visa hierarquizar e priorizar os riscos para facilitar sua avaliação e gestão, sendo a matriz de priorização de risco o método mais utilizado, baseado na probabilidade de um evento perigoso ocorrer e o seu impacto na saúde – Figura 5) (Brasil, 2012).

Figura 5 - Exemplo de matriz qualitativa de priorização de risco do SANASA

Frequência		Severidade				
		1	2	4	8	16
		Insignificante	Baixa	Moderada	Elevada	Catastrófica
5	Quase Certo (diária a semanalmente)	Baixo (5)	Moderado (10)	Alto (20)	Alto (40)	Extremo Plano de Emergência
4	Muito Provável (quinzenal a mensal)	Baixo (4)	Moderado (8)	Alto (16)	Alto (32)	Extremo Plano de Emergência
3	Provável (semestral a anual)	Baixo (3)	Moderado (6)	Moderado (12)	Alto (24)	Extremo Plano de Emergência
2	Pouco Provável (acima de um ano ate 5 anos)	Baixo (2)	Baixo (4)	Moderado (8)	Alto (16)	Extremo Plano de Emergência
1	Raro (Acima de 5 anos)	Baixo (1)	Baixo (2)	Baixo (4)	Moderado (8)	Extremo Plano de Emergência

Fonte: Isenburg; Pinto (2024).

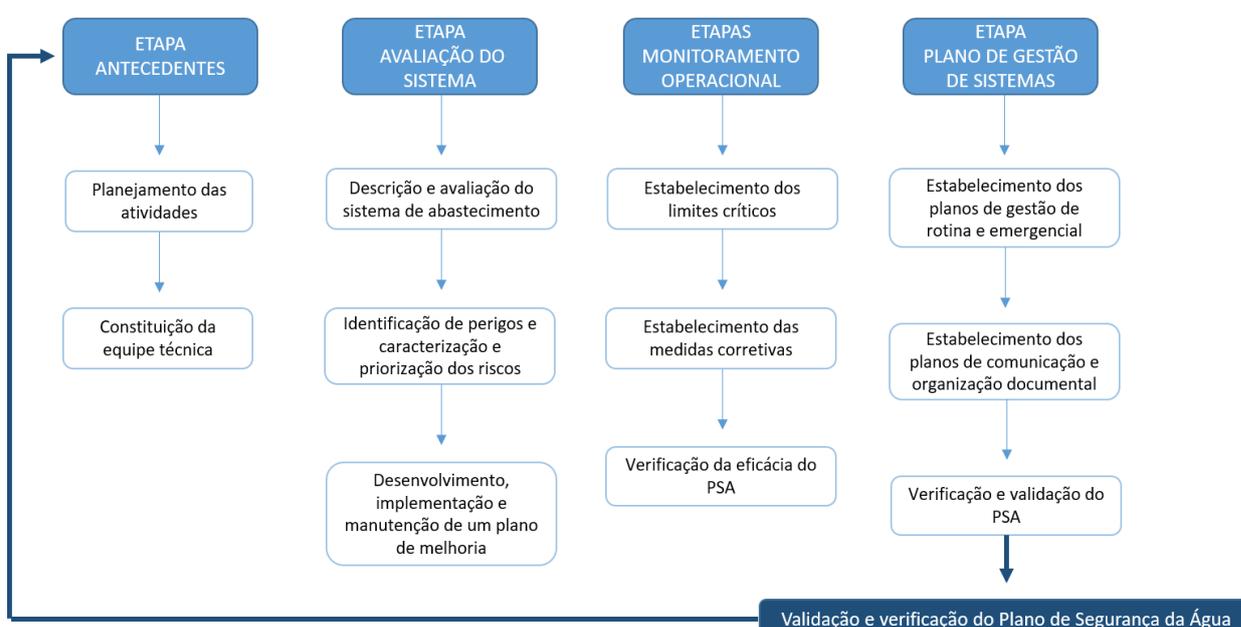
No risco insignificante, não existe impacto detectável; No risco de severidade baixo, encontra-se impacto sobre a qualidade estética e organoléptica da água e/ou baixo risco à saúde que pode ser minimizado na etapa seguinte do sistema de abastecimento; No moderado, observa-se elevado impacto estético e/ou com potencial risco à saúde que pode ser minimizado na etapa seguinte do sistema de abastecimento; No risco de severidade elevado, têm-se impacto à saúde que não pode ser minimizado em etapa seguinte do sistema de abastecimento, necessitando de realização de monitoramento operacional e medidas de controle; Por fim, no catastrófico, nota-se elevado risco à saúde com interrupção do fornecimento de água (Isenburg; Pinto, 2024).

Sendo, risco baixo ≤ 5 (controlável por meio de procedimentos de rotina); risco moderado até 12 (necessidade de atenção e de identificação de pontos críticos de controle, pontos críticos ou pontos de atenção); risco alto 16 a 40 (não tolerável, necessidade de adoção de medidas de controle, e/ou ações de gestão ou de intervenção física a médio e longo prazo);

risco extremo >40 (risco não tolerável, necessidade de adoção imediata de plano de emergência) (Isenburg; Pinto, 2024).

O PSA deve ser estruturado de uma forma simples e objetiva, de modo a facilitar o entendimento dos aspectos essenciais relacionados com a gestão de pontos de controle e definição dos pontos críticos do sistema. Pontos de controle devem ser estabelecidos para cada uma das três etapas do sistema (tratamento, distribuição e reservação), escolha que deve ser embasada nos resultados da análise de risco em soluções alternativas de abastecimento, mas sem renunciar à qualidade do resultado final. De uma forma geral, as etapas para o desenvolvimento do PSA incluem a avaliação do sistema, o monitoramento operacional e os planos de gestão (Figura 6) (Brasil, 2012).

Figura 6 - Etapas para o desenvolvimento de um Plano de Segurança da Água



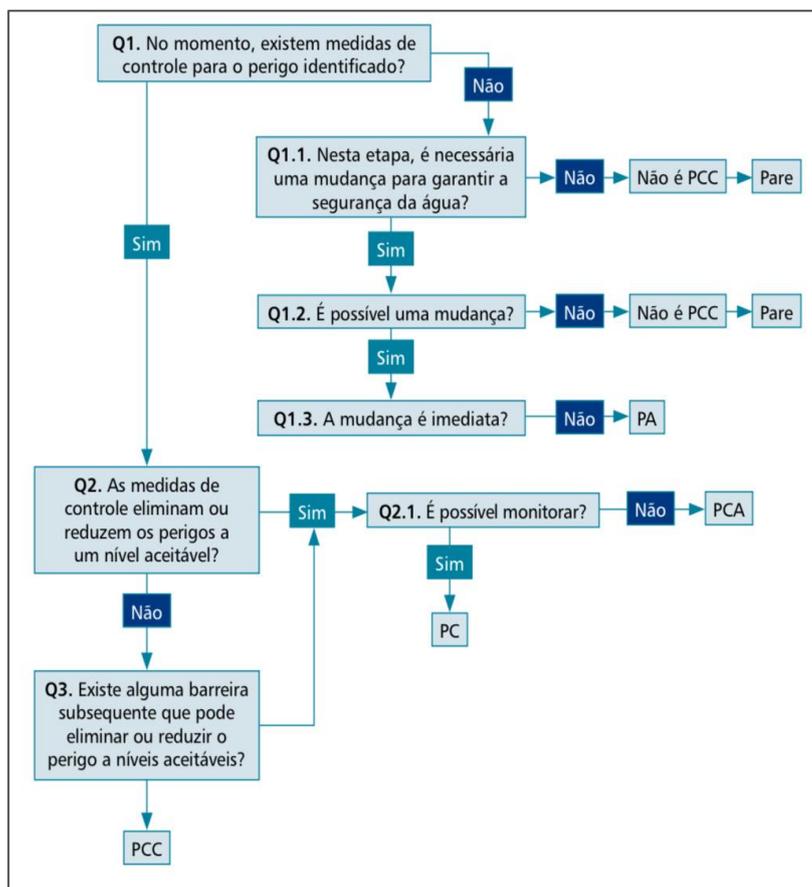
Fonte: Junior *et al.* (2020)

Na etapa de antecedentes, segundo Brasil (2012), é necessária a constituição da equipe multidisciplinar, bem como planejamento das atividades e levantamento das informações. Na etapa de avaliação do sistema, é onde será realizada toda a descrição do sistema de abastecimento (incluindo a construção e validação do diagrama de fluxo), buscando identificar os perigos, priorizar os riscos e, por fim, desenvolver e implementar medidas de controle dos pontos críticos (Figura 7). A descrição deve incluir:

Uma narrativa sobre o uso e a ocupação do solo, medidas de proteção das bacias hidrográficas, além de informações sobre a quantidade e qualidade da

água dos mananciais de captação, os processos de tratamento aplicados, os reservatórios dentro dos sistemas e sobre os sistemas de distribuição. A avaliação pode ser da infraestrutura existente, das propostas de melhorias e de projetos para implantação de novos sistemas de abastecimento de água. Como a qualidade da água para consumo humano varia, ao longo do sistema, a avaliação deve determinar se a qualidade final da água distribuída aos consumidores atenderá aos padrões estabelecidos nas metas de saúde (Brasil, 2012).

Figura 7 - Identificação de pontos críticos de controle



Fonte: Brasil (2012).

Na etapa de monitoramento operacional, deverá se determinar as medidas de controle dos sistemas de abastecimento baseadas no princípio das múltiplas barreiras, selecionar parâmetros de monitoramento bem como seus limites críticos e, à medida que as falhas forem surgindo, estabelecer ações corretivas. De modo geral, esta etapa visa realizar um gerenciamento eficaz do sistema a partir da obtenção de dados de monitoramento e assegurar que as metas de saúde sejam alcançadas.

Por fim, a última etapa é o plano de gestão dos sistemas que possibilitam a verificação constante do PSA, por meio do estabelecimento de ações em situações de rotina e emergenciais;

da organização da documentação de avaliação do sistema; do estabelecimento de comunicação de risco, programas de suporte, validação e verificação periódica do PSA.

A aplicação do PSA tem se mostrado eficiente em diversos países, como por exemplo, na Austrália, onde o plano foi implementado em 2004 e desde então, tem sido utilizado em diversas regiões do país, apresentando resultados positivos na redução de riscos à saúde pública (Doh, 2014). Outro exemplo é a cidade de Barcelona, na Espanha, que implementou o PSA em 2012, reduzindo em 70% o número de casos de gastroenterite associados à água (WHO, 2017).

No Brasil, o PSA tem sido implementado em diversas cidades e regiões do país, buscando garantir a segurança hídrica para a população, como em Campinas e Belo Horizonte, com implementação do PSA nos anos de 2013 e 2014, respectivamente. O objetivo é de garantir a segurança hídrica para a população e reduzir os riscos de contaminação da água, distribuindo, assim, água de qualidade para a população. Através do PSA, foram implementadas ações de gestão integrada do sistema de abastecimento de água, com monitoramento da qualidade da água em todas as etapas do processo, desde a captação até a distribuição (Barroso *et al.*, 2016).

A aplicação do PSA é importante para garantir a segurança hídrica mundial. Além disso, o PSA é uma ferramenta importante para gestão integrada dos sistemas de abastecimento de água, permitindo uma maior eficiência e eficácia na gestão dos recursos hídricos (WHO, 2011).

Atualmente, os desafios da implementação do PSA envolve uma série de fatores, podendo destacar: Sensibilização dos gestores das Empresas de Abastecimento; Desenvolvimento do PSA de forma articulada intersetorialmente, inclusive com a participação dos consumidores e da comunidade; Capacitação de técnicos para o desenvolvimento e implementação de PSA; Desenvolvimento do PSA de forma coerente com outros planos que estão sendo desenvolvidos no mesmo território; Não reconhecer determinados procedimentos e processos já realizados como parte do PSA; Relacionar os dados epidemiológicos com os dados de qualidade da água para definição das metas de saúde; Crise hídrica atual; Avaliação dos impactos dos PSA na saúde e na economia (Ventura; Filho; Nascimento, 2019; WHO, 2017).

Devido as dificuldades de implementação do PSA, pode ser notado que em algumas localidades do mundo ele tem sido deixado de lado, como em alguns países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e EUA, sendo essa, uma importante ferramenta para a implementação de uma autocritica no modelo criado, com o objetivo de remodelar e melhorar as etapas problemáticas (Baum; Bartram, 2017).

Por fim, é importante destacar que o PSA deve ser aplicado de forma integrada, envolvendo diversos atores, como empresas de abastecimento de água, agências reguladoras,

órgãos de saúde e meio ambiente, além da própria população. Através de uma gestão participativa e integrada é possível garantir a segurança hídrica e a qualidade da água para consumo humano, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população (Barroso *et al.*, 2016).

3.5 Análise de risco

O setor do saneamento destaca-se como um exemplo marcante de como a interação entre fenômenos naturais e atividades humanas, ambos precursores e modificadores do meio, geram riscos à segurança e proteção cidadã. A falta de infraestrutura adequada de saneamento gera também danos significativos à saúde pública e à economia da sociedade. Constituem, portanto, uma área de interesse por meio do estudo de ações preventivas, mitigadoras e recuperativas das suas causas e efeitos, assim, diminuindo os riscos (Júnior; Mendiondo, 2018).

Inicialmente, vale destacar a diferença entre perigo e risco. O perigo refere-se a algo que tem a capacidade de causar potencial dano, ou seja, o agente desencadeador, podendo ele ser de origem natural ou antrópica (Naime, 2019; Verçosa, 2017). Já o risco pode ser definido como o resultado do produto entre a probabilidade da ocorrência de um evento considerado potencialmente perigoso e a extensão dos danos provocados. Em outras palavras, risco é o potencial da realização de uma consequência adversa e indesejada à vida humana, à saúde, à propriedade ou ao meio ambiente (Calijuri; Cunha, 2013; Sanchez, 2013; Silva *et al.*, 2014). Por exemplo, embora um produto químico seja extremamente perigoso (alto perigo), o risco do dano pode ser variável dependendo do grau de exposição a ele.

Nesse contexto, a análise de risco identifica os perigos, em seguida avalia a probabilidade de ocorrência de eventos danosos às pessoas, propriedades e meio ambiente decorrentes desses perigos e, por fim, as consequências desses eventos (Naime, 2019). Mediante essa ferramenta, é possível implementar a formulação de intervenções estratégicas para a prevenção, mitigação e gestão apropriada. Ademais, essa abordagem propicia a incorporação ativa da comunidade afetada nas iniciativas de resolução e supervisão de questões críticas, fortalecendo assim a inclusão da sociedade por meio do engajamento comunitário e da responsabilidade compartilhada (Bastos *et al.*, 2009).

Essa ferramenta constitui-se como um processo extensivo e sistematizado, proporcionando uma abordagem holística à gestão de risco, englobando três etapas distintas e inter-relacionadas: i) avaliação do risco (como citado anteriormente); ii) gerenciamento do risco (seleção das alternativas técnicas, políticas e a escolha das ações regulatórias mais adequadas

que devem ser executadas para minimizar e/ou mitigar os riscos avaliados) e iii) comunicação do risco (processo interativo de troca de informações entre às partes interessadas sobre os riscos provenientes de determinada situação) (Brasil, 2006; Haas; Rose; Gerba, 2014; Ogata *et al.*, 2016). A quantificação do risco representa a etapa mais desafiadora do processo de gerenciamento de risco, decorrente da grande incerteza que pode acompanhar a análise, especialmente quando se considera a precisão necessária e o número de variáveis envolvidas (Vianna, 2015).

É importante destacar que a avaliação de riscos em sistemas de abastecimento de água para consumo humano não é um fim em si mesma, mas sim um meio para estruturar o processo decisório. Essa etapa serve como ponto de partida para a definição de procedimentos que sublinham a importância vital do acesso à água segura, garantindo assim a promoção da saúde pública (Lucena, 2018).

Vários são os métodos de análise de risco utilizados com o objetivo de identificar potenciais falhas de um sistema e/ou processo e, a partir disso, reduzir os riscos associados por meio da eliminação dessas falhas de forma preventiva (Junior; Rodrigues, 2022), entre eles pôde-se citar a Análise dos modos de falha e efeito (FMEA) e o método HAZOP.

O método FMEA é dividido em FMEA de produto, relacionado às falhas que poderão ocorrer no produto dentro das especificações do projeto, e o FMEA de processo, no qual está relacionado às falhas que poderão ocorrer no planejamento do processo, levando-se em consideração as não conformidades apresentadas no produto, relacionadas às especificações do projeto. As principais vantagens desse método são: fácil aplicação, modelo padronizado, classificação de risco e análise de subsistemas. Entretanto, quanto às desvantagens destacam-se: análise demorada, não considera falhas de modo comum ou combinação de falhas e examina falhas não perigosas, nesse sentido é de fundamental importância que a equipe de especialistas tenha um discernimento claro sobre a área de estudo com objetivo de minimizar as possíveis falhas (Lucena, 2018).

Pelas suas características de simulação e previsibilidade, o método HAZOP (*Hazard Operability Analysis*) busca identificar possíveis desvios de projeto ou da operação de uma instalação, com a utilização de técnicas de reunião, nas quais o líder da equipe orienta o grupo por meio de um conjunto de palavras guias que focalizam os desvios dos parâmetros estabelecidos para o processo ou a operação em exame (Silva, 2014). O método HAZOP tem como vantagens: a fácil aplicação, a elevada aceitabilidade e padronização, a ausência de modelo matemático e a identificação das causas possíveis, dos desvios, suas consequências e as ações requeridas para obter a segurança do sistema. Entretanto, quanto às desvantagens

destacam-se: a necessidade de uma equipe multidisciplinar treinada, o conhecimento do processo, é um método demorado, em projetos novos deve ser complementado com outros métodos e a necessidade de detalhamento completo do processo (Lucena, 2018).

3.6 Ozonização

O ozônio é um gás instável produzido quando as moléculas de oxigênio se dissociam, formando oxigênio atômico que reage com uma molécula de oxigênio. A estabilidade do ozônio no ar é maior que na água, mas, em ambos os meios, essa estabilidade é de poucos minutos (Metcalf; Eddy, 2016).

Atualmente, a sua excelente utilização como agente desinfetante e/ou oxidante o torna uma técnica competitiva, principalmente após a descoberta de subprodutos oriundos do processo de desinfecção com cloro, os compostos halogenados os quais são perigosos a saúde humana, como também, a determinação da resistência à cloração convencional de alguns microrganismos patogênicos como, por exemplo, cistos de *Giardia* e os oocistos de *Cryptosporidium*. Além disso, o ozônio não deixa resíduos químicos nocivos na água, o que é particularmente benéfico para comunidades rurais que podem ter limitações no monitoramento contínuo da qualidade da água tratada (Hafeez *et al.*, 2021; John *et al.*, 2020). Sendo assim, o ozônio tem se mostrado uma alternativa promissora, sendo amplamente utilizado para desinfecção no tratamento de água potável.

Além de seu poder desinfetante, o ozônio desempenha um papel importante na remoção de compostos responsáveis pela coloração, odor e sabor da água, eliminação de ferro e manganês, redução de micropoluentes (incluindo pesticidas e compostos fenólicos) e no aumento da biodegradabilidade da matéria orgânica dissolvida. Principalmente, em comunidades que utilizam fontes de água não tratada, como poços, captação de água da chuva, cisternas, entre outras. Além do mais, o uso do ozônio pode melhorar a eficiência dos processos de coagulação e filtração, contribuindo para um tratamento mais abrangente e eficiente (Manasfi, 2021).

Trabalhos como os de Daniel; Leite (2021), Hafeez *et al.* (2021) e Mecha; Chollom (2020) já mostram a importância da sua utilização para desinfecção de água para abastecimento e de efluentes, e em sistemas de reúso de água para oxidação de componentes orgânicos refratários solúveis em substituição ao processo de adsorção em carvão ativado. Como não há separação dos processos, ao se usar o ozônio como agente desinfetante, inevitavelmente também ocorrerá a oxidação de substâncias orgânicas e inorgânicas, o que se torna vantajoso

ao se considerar que os compostos tem difícil degradação por via biológica poderão ser oxidados a compostos mais facilmente assimiláveis (Daniel; Leite, 2021).

De maneira geral, pelo fato do ozônio ser um oxidante extremamente reativo, ele inativa os microrganismos pela desintegração da parede celular ou lise celular. Além disso, o processo de ozonização não aumenta a concentração de sólidos dissolvidos, e a eficiência da desinfecção não é afetada pela presença da amônia e, embora sua ação não seja influenciada pelo pH da água, meios mais ácidos apresentam melhor eficiência. Por esse motivo, a ozonização é uma alternativa ao processo de cloração (Premjit *et al.*, 2022).

Além disso, ele pode ser empregado em diferentes etapas do tratamento, como por exemplo: na etapa de pré-tratamento da água, para remoção de microalgas e cianobactérias; quando a qualidade da água apresenta elevados valores de matéria orgânica, se aplicando antes da etapa de decantação; e na desinfecção (Camel; Bermond, 1998). Uma outra vantagem dessa tecnologia é que ela pode ser gerada na própria planta de tratamento, ou seja, *in loco*, a partir de uma descarga elétrica efetuada de forma controlada por um ozonizador, diferente do cloro que necessita de reposição contínua do reagente. Embora vantajosa a sua utilização, algumas desvantagens podem ser citadas quanto ao sistema de ozonização, como por exemplo os elevados custos de implantação, impossibilidade de transporte e armazenamento e, por fim, baixa solubilidade (Dewi *et al.*, 2024).

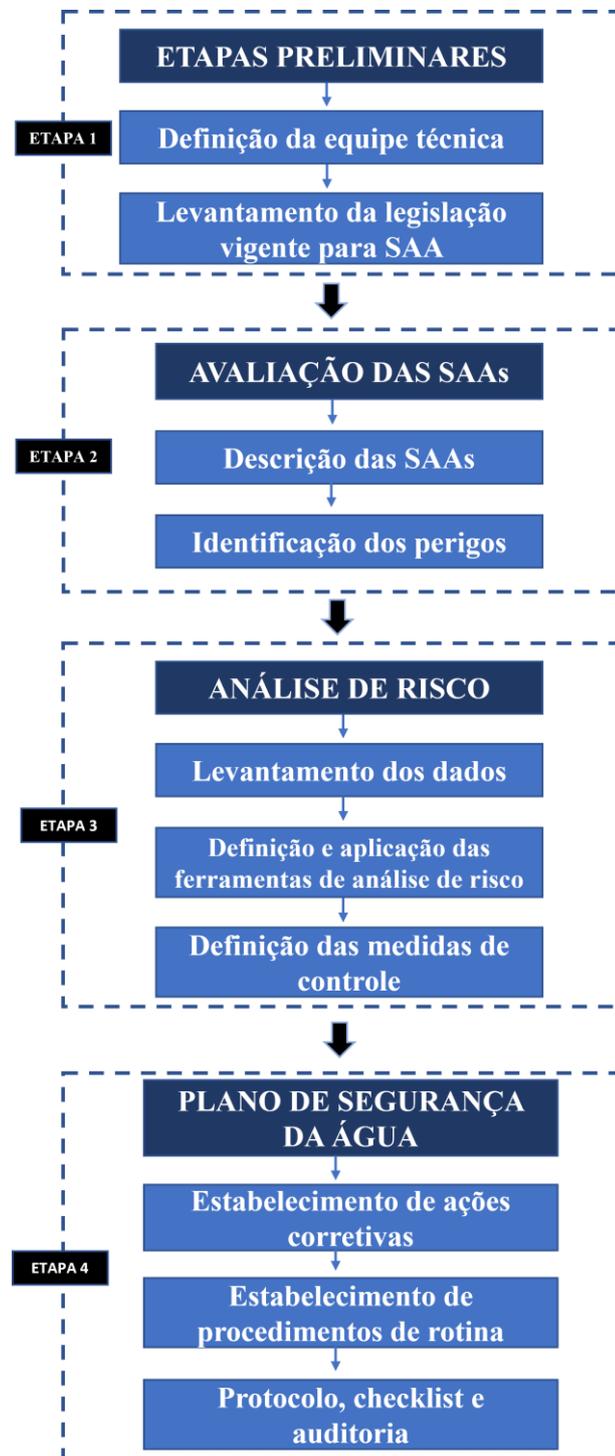
Além disso, a instalação de sistemas de ozonização pode ser adaptada a diferentes contextos, como caminhões-pipa, água da chuva, captação direta de água subterrânea, permitindo flexibilidade na escolha da fonte de abastecimento. Esses sistemas oferecem uma solução eficaz, sustentável e de baixo impacto ambiental, ideal para áreas onde o acesso a recursos e a manutenção contínua de sistemas convencionais de tratamento é limitada (Chen, 2020).

Apesar das vantagens da ozonização no tratamento de água potável, sua aplicação em países em desenvolvimento ainda é limitada. Isso se deve ao fato de que os métodos convencionais de produção de ozônio requerem campos elétricos de alta intensidade, normalmente na faixa de quilovolts, além de necessitar de oxigênio puro como gás de alimentação, em vez de ar ambiente, para gerar ozônio (O) de forma eficiente (Song, 2020). A *World health organization* alerta que o uso do ozônio em pequenas aplicações domésticas não é recomendado, principalmente devido à necessidade de uma fonte elétrica confiável, à complexidade dos equipamentos de geração e dosagem, e ao custo elevado associado a essa tecnologia. Esses fatores tornam o ozônio uma opção menos acessível para áreas com infraestrutura limitada (WHO, 2017b).

4 METODOLOGIA

A pesquisa em pauta segue uma série de etapas metodológicas apresentadas de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura 8:

Figura 8 – Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas no estudo



Fonte: O autor (2024).

- 1ª Etapa: Etapa preliminar, nessa etapa foram organizadas as atividades a serem realizadas, definiu-se a equipe técnica de trabalho para a realização do estudo e realizou-se um levantamento das legislações vigentes mais prevalentes para as soluções alternativas de abastecimento;
- 2ª Etapa: Descrição das soluções alternativas de abastecimento existentes de forma detalhada, construção dos diagramas de fluxo e identificação dos perigos potenciais em cada fonte de abastecimento;
- 3ª Etapa: Levantou-se os dados necessários sobre as soluções alternativas de abastecimento para subsidiar a realização da análise de risco, definiu-se a ferramenta de análise de risco mais adequada ao estudo e, por fim, detalhou-se e identificaram-se os pontos críticos das SAC na fase do processo e produto, a fim de definir as medidas de controle mais adequadas;
- 4ª Etapa: Proposição, a partir das medidas de controles definidas na etapa anterior, ações corretivas com estabelecimento de novos procedimentos de rotina, com a elaboração de protocolos de rotina, checklist e procedimentos de auditoria específicos para soluções alternativas.

4.1 Etapas preliminares

4.1.1 Definição da equipe técnica

As etapas preliminares do PSA consistiram no planejamento cuidadoso das atividades a serem realizadas, na coleta de informações necessárias para a execução do plano, e na formação de uma equipe técnica especializada, responsável tanto pela elaboração quanto pela implantação dos estudos de análise de risco. Esta fase inicial foi importante para estabelecimento de uma base sólida no desenvolvimento assertivo do plano de segurança da água.

Assim, foram realizadas reuniões, conduzidas por um coordenador, com uma equipe multidisciplinar, composta por quatro especialistas (engenheiros de campo, mestres e doutores em diversas áreas) qualificados no campo pertinente. Esta equipe foi encarregada de estabelecer os objetivos iniciais da pesquisa, e selecionar as ferramentas e estratégias apropriadas para uma avaliação aprofundada SAC. A seleção desses profissionais foi baseada não apenas no respectivo domínio de conhecimento na área, mas também em contribuições científicas significativas no campo de estudo em questão.

4.1.2 Legislação vigente para soluções alternativas de abastecimento

Prosseguindo a etapa preliminar, foi realizado um levantamento bibliográfico das principais legislações pertinentes as SAA e SAC e analisado os modelos de gestão propostos para diferentes fontes de abastecimento.

Ao analisar o conjunto de leis vigentes no Brasil, é possível inferir que o modelo de gestão mais recomendado para utilização em sistemas de abastecimento de água e soluções alternativas no país é o PSA. Essa constatação torna-se evidente ao ser examinado o Artigo 49 da Portaria GM/MS nº 888 de 2021, a qual dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, emitida pelo Ministério da Saúde, o qual estabelece:

Art. 49 A Autoridade de Saúde Pública poderá exigir dos responsáveis por SAA e SAC a elaboração e implementação de Plano de Segurança da Água (PSA), conforme a metodologia e o conteúdo preconizados pela Organização Mundial da Saúde ou definidos em diretrizes do Ministério da Saúde, para fins de gestão preventiva de risco à saúde.

A referida portaria, em seu Art. 50, versa que o próprio responsável pela operação da SAA ou SAC deve solicitar qualquer tipo de alteração no monitoramento do sistema de abastecimento, quanto na forma de implantação do PSA. Outras normas robustecem a utilização do PSA nesses modelos de abastecimento de água, como a recém publicada edição da NBR ABNT 17.080/2023, que trata dos princípios e diretrizes para elaboração e implementação do PSA. Sendo assim, podem ser realizadas adaptações no modelo proposto pelos órgãos competentes com o objetivo de atender às necessidades de cada caso e região.

4.2 Avaliação das soluções alternativas de abastecimentos

4.2.1 Descrição das soluções alternativas de abastecimento

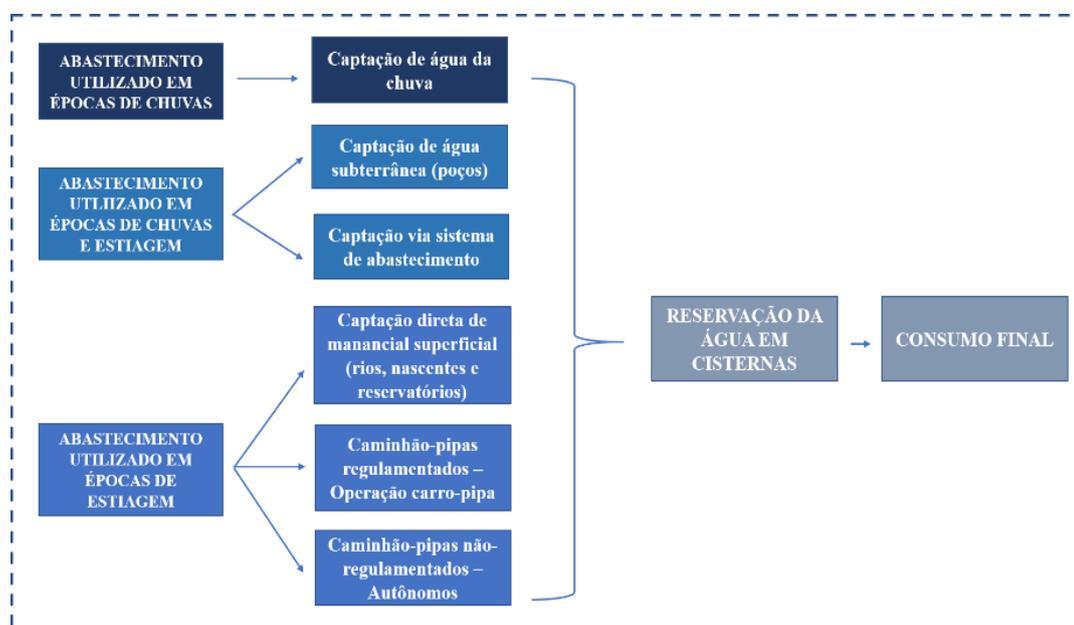
Nas localidades dispersas, onde a infraestrutura de abastecimento de água convencional pode não ser viável devido às grandes distâncias, baixa densidade populacional ou recursos limitados, são frequentemente implementados modelos de soluções alternativas de abastecimento. Estes modelos visam fornecer acesso seguro e sustentável à água potável para atender às necessidades da população local. No entanto, muitas vezes esses modelos são

associados a obtenção de água de qualidade duvidosa, visto que, seus processos são mais simplificados e o controle é dificultado pela falta de monitoramento.

As SAC em localidades dispersas podem adotar diferentes métodos de captação de água, o que torna a implementação de um modelo de gestão padronizado particularmente desafiador. A principal razão para essa dificuldade é que, nessas áreas, a disponibilidade de água é o fator determinante na escolha da fonte de abastecimento. Consequentemente, a população geralmente utiliza a fonte de água mais acessível, mesmo que ela não seja a mais adequada em termos de qualidade. Por exemplo, se a região estiver em períodos de chuvas a água é preferencialmente obtida por meio de captação direta via cisternas, já se a época de estiagem e esse recurso cessou, são utilizadas outras fontes disponíveis, como, por exemplo, captação aquíferos superficiais ou abastecimento por veículo transportador.

As fontes de abastecimento comumente utilizados nessas localidades são: captação de água de chuva, poços rasos ou tubulares, abastecimento com rede convencional (quando há), captação direta em mananciais superficiais (rios, nascentes e reservatórios) e abastecimento por veículo transportador (Caminhão-pipas regulamentados ou autônomos). Diante dessa quantidade de alternativas, torna-se um desafio prever, com precisão, qual técnica será eventualmente empregada e, sobretudo, discernir o modelo de gestão ótimo para promover a segurança hídrica da população. O fluxograma da Figura 9 detalha as fontes mais comumente utilizadas em localidades dispersas, como também destaca a sua prevalência dependendo da estação climatológica da região.

Figura 9 – Fontes de abastecimento em localidades dispersas



Fonte: O autor (2024).

No entanto, é fundamental salientar que essas localidades são caracterizadas por populações vulneráveis, normalmente ligadas à agricultura de subsistência, que são frequentemente delineadas por uma demografia que exhibe baixos níveis de instrução formal, além de enfrentarem desafios recorrentes associados à adversidade econômica. Sendo assim, a problemática da obtenção da água é um dos fatores integrantes característicos da realidade dessas comunidades.

4.2.2 Identificação dos perigos

Para a identificação dos perigos potenciais dos SAC, foram utilizados fluxogramas das fontes mais comuns de abastecimento de água em comunidades dispersas e suas possibilidades de tratamento, reservação e consumo, respectivamente. Essa metodologia é preconizada pelo PSA por ilustrar de maneira clara e detalhada todas as fases das SAC, desde a captação até o consumo, sendo uma importante ferramenta facilitadora de identificação dos perigos.

Cada etapa do processo de abastecimento foi numerada pela equipe avaliadora com o intuito de facilitar a identificação dos eventos perigosos de cada fonte fornecedora de água, possibilitando, posteriormente, a realização da análise de risco no produto e no processo de abastecimento em seus diferentes modelos. Nessa fase, foram identificadas as possíveis causas de contaminação (onde, quando e como ocorreram) e associadas às medidas de controle para cada perigo identificado.

A Figura 10 apresenta o fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação de água de chuva, onde as primeiras etapas são: o telhado (1), calha de coleta (2) e tubulação (3), as quais desempenham um papel fundamental na barreira de contaminação da qualidade microbiana da água que foi captada, visto que, são etapas que ficam mais suscetíveis ao meio e conseqüentemente a sua degradação. Os principais fatores de suscetibilidade a contaminação nessa fonte de abastecimento, são a falta do descarte das primeiras chuvas no período de maior pluviosidade, uma vez que, essas primeiras águas, tem grande carga que contaminação por carrearem o material que estava acumulado na estrutura do telhado para as etapas subsequentes, outro fator a ser destacado, é a realização de manutenções periódica nessas estruturas para evitar o acúmulo de sujidades.

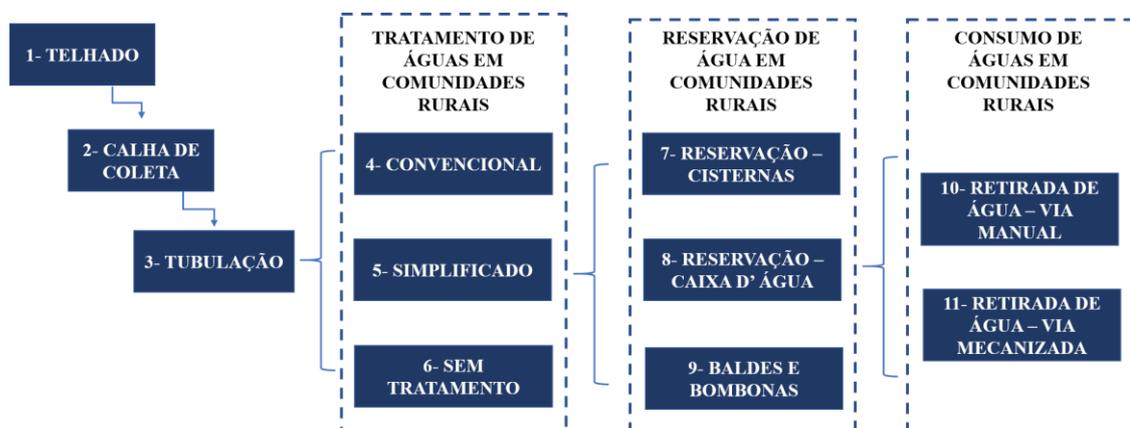
Já nas etapas de tratamento foram elencadas três situações possíveis para essa fonte de captação: o tratamento convencional (4), o tratamento simplificado (5) e sem tratamento (6). O tratamento convencional consiste em uma técnica bastante eficaz na remoção de contaminantes por meio de várias etapas. No entanto, requer infraestrutura e manutenção rigorosa para garantir

sua eficácia, incluindo a manipulação adequada de produtos químicos e a manutenção de equipamentos. O tratamento simplificado é menos complexo e mais barato, entretanto pode não ser tão eficiente na eliminação de todos os tipos de contaminantes, deixando a água suscetível a riscos residuais. Por fim, a não utilização de tratamento, sendo apresentada no fluxograma como “sem tratamento”, deixa a água vulnerável a todos os contaminantes iniciais, o que é extremamente arriscado, especialmente se tratando de uma técnica de coleta direta (Figura 10).

A reservação da água pode ser feita por três formas comumente utilizadas: Cisternas (7), caixa d’água (8) e baldes e bombonas (9). As cisternas estas são eficazes para armazenar grandes volumes e manter a água protegida de contaminações diretas. Contudo, se mal construídas ou mantidas, podem ser contaminadas por microrganismos no momento da coleta ou serem infectadas por infiltração de águas subterrâneas. A caixa d’água, onde há a reservação de água em localidade elevada, a qual protege contra a contaminação direta, mas requer limpeza e manutenção frequentes para evitar o desenvolvimento de biofilmes e a proliferação de microrganismos. Os baldes e bombonas, onde o manuseio e armazenamento desses recipientes apresentam risco significativo de recontaminação, especialmente se não forem tomadas as devidas precauções sanitárias, quando há manipulação deles.

Por fim, a retirada da água pode ser realizada por via manual (10) ou mecanizada (11). A retirada manual pode introduzir contaminação por toque humano, enquanto a retirada mecânica pode ser mais higiênica, embora dependa da manutenção do equipamento utilizado e um maior investimento financeiro (Figura 10).

Figura 10 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação de água de chuva



Fonte: O autor (2024).

A Figura 11 apresenta o fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação de água subterrânea (poços) e as diferentes etapas no manejo da água, desde a captação até o seu consumo, em soluções alternativas de abastecimento. A seguir serão abordadas as etapas iniciais de captação de água (12) e transporte de água bruta (13), visto que as etapas de tratamento, reservação e consumo já foram detalhadas anteriormente.

A captação da água (12) pode ocorrer via bombeamento mecânico, que utiliza bombas para extrair a água, ou por métodos manuais, como balde, recipientes com auxílio de cordas. O principal perigo desse método reside na contaminação da fonte ou do meio de transporte, os quais, apresentam riscos adicionais, pois o contato humano direto pode introduzir contaminantes ou microrganismos patogênicos pela falta de condições sanitárias.

Após a captação, é feito o transporte da água bruta (13), no qual a água é levada até o local de tratamento ou não e, posteriormente, armazenamento. Este transporte pode ser feito por tubulações, veículos, ou até mesmo de canais abertos em casos de sistemas mais rudimentares. O risco de contaminação durante o transporte reside na entrada de contaminantes externos, como resíduos agrícolas em canais abertos ou rupturas e falhas em tubulações que permitam a entrada de poluentes do solo ou até mesmo de vetores de contaminação.

Figura 11 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação de água subterrânea (poços)



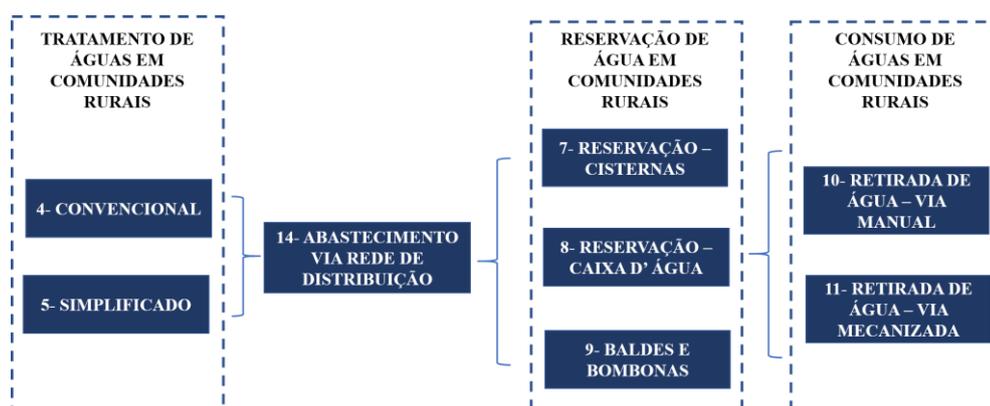
Fonte: O autor (2024).

A Figura 12 apresenta o fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via rede de distribuição convencional, esse é outra modalidade de abastecimento utilizada em localidades dispersas, abastecimento via rede de distribuição (14). Essa técnica é caracterizada por entregar uma água com maior segurança sanitária, visto que a água passa por um tratamento

convencional ou simplificado antes de ser distribuída. Após esse procedimento, pode ser armazenada de diversas maneiras, como detalhadas anteriormente.

É importante salientar que essa técnica é disponível para uma pequena parcela das localidades dispersas, geralmente localizadas no final da rede, as quais sofrem com intermitência de abastecimento regulamente. Neste caso, as companhias de abastecimento priorizam a implementação desse modelo aglomerados urbanos, quando há viabilidade econômica para sua implementação.

Figura 12 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via rede de distribuição convencional

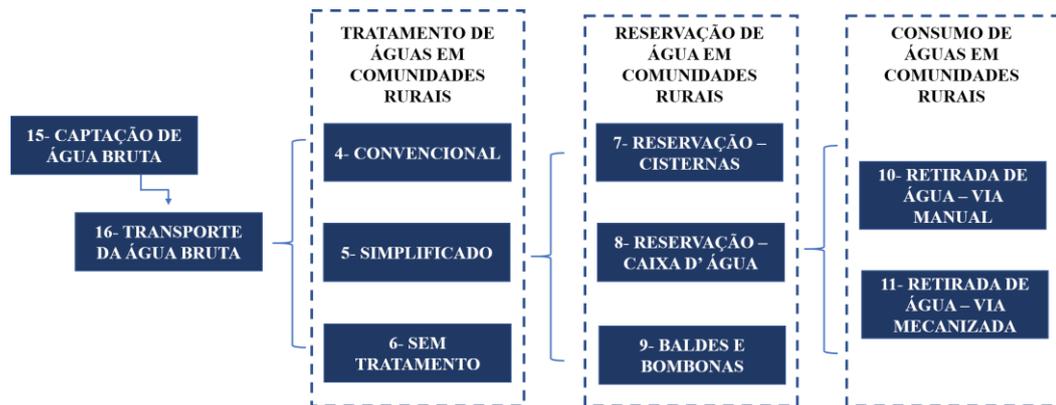


Fonte: O autor (2024).

A Figura 13 apresenta fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação direta de manancial superficial (rios, nascentes e reservatórios) a modalidade de abastecimento por captação direta de manancial superficial também é utilizada como uma opção de fonte de coleta de água em localidades dispersas. A captação de água bruta (15), pode ser realizada de diversas formas, como: manual ou mecanizada, com o auxílio de baldes, recipientes, bombonas, cordas e mangueiras. Com essa abundância de variáveis, há um aumento da dificuldade de gerenciar os riscos de contaminação dessa água no momento da coleta, sendo comum o excesso de material particulado na água ocasionado pela forma como essa coleta é realizada.

Já o transporte da água bruta (16) pode ser realizado por encanações, canais, transporte manual ou animal e veículos transportadores. Posteriormente, a água pode passar por um tratamento convencional, simplificado ou até mesmo não ser tratada antes da reservação e consumo.

Figura 13 – Fluxograma do abastecimento em localidades dispersas via captação direta de manancial superficial (rios, nascentes e reservatórios)



Fonte: O autor (2024).

A última fonte de água em comunidades dispersas abordadas no estudo é apresentada pela Figura 14 com o fluxograma esquemático abastecimento em comunidades dispersas via caminhão-pipas regulamentados ou autônomos, sendo uma técnica muito utilizada nas épocas de estiagens nessas regiões.

A primeira etapa dessa técnica na Figura 14 é o abastecimento do caminhão no reservatório (17), que pode ser de água tratada ou não, conforme a autorização ou não do veículo transportador. Posteriormente, o veículo faz o transporte da água (18) para a localidade consumidora e realiza o abastecimento do reservatório (19). Nessa técnica de abastecimento da água pode ou não passar por tratamento, sendo possível ser realizado antes ou após o transporte.

Figura 14 – Fluxograma esquemático do abastecimento de água em comunidades dispersas via caminhões-pipa regulamentados ou autônomos



Fonte: O autor (2024).

4.3 Análise de risco

4.3.1 Levantamento dos dados

Nesta etapa, foi realizado o levantamento dos dados secundários junto a órgãos competentes, como Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), Centro de Vigilância Ambiental e Zoonoses, Secretaria Municipal de Saúde de Campina Grande – PB, Defesa Civil Municipal, Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), 31º Batalhão de Infantaria Motorizada (31ºBIMtz), além de consultas a trabalhos científicos nacionais e internacionais, os quais subsidiaram a realização do estudo.

Os dados de monitoramento da qualidade da água na zona rural foram obtidos junto ao Centro de Vigilância Ambiental e Zoonoses, do portal VIGIAGUA e da dissertação de Lucena, 2018. Já as informações sobre a rede de abastecimento de água foram fornecidas pela CAGEPA. Esses dados forneceram informações fundamentais, incluindo as características das áreas abastecidas por soluções alternativas, além de diversas informações técnicas e operacionais sobre o abastecimento dessas localidades no Brasil.

4.3.2 Definição e aplicação das ferramentas de análise de risco

A partir da avaliação dos dados pela equipe de especialistas, foram escolhidos dois métodos para a realização da análise de risco da pesquisa: HAZOP e FMEA para a avaliação do processo e produto, respectivamente. A escolha dessas metodologias deve-se às suas características de versatilidade e confiabilidade, sendo essas amplamente reconhecidas pela capacidade de identificar potenciais falhas, tanto em sistemas novos quanto em operação. Além disso, esses métodos facilitam a proposição de medidas mitigadoras, que visam eliminar ou reduzir os riscos identificados, aumentando a confiabilidade do processo e a integridade do produto final (Gonçalves, 2023; Junior; Rodrigues, 2022).

No que tange à implementação do HAZOP e FMEA a literatura apresenta uma diversidade de abordagens aplicação em variados contextos. Não há um padrão obrigatório que deva ser seguido, permitindo que o aplicador, em colaboração com sua equipe de avaliação, defina os elementos cruciais para cada análise (Carvalho, 2023; Silveira, 2022). Isso inclui a seleção de parâmetros, palavras-guias e possíveis desvios como na Tabela 7 de referência utilizada para o HAZOP.

Tabela 7 – Parâmetros de referência utilizados para realização do HAZOP de processo

PALAVRA-GUIA	SIGNIFICADO	PARÂMETRO/DESVIO
Não ou Nenhum	Não se consegue o que se pretende	Vazão – não existe vazão
Mais ou Aumento	Aumento quantitativo no parâmetro	Mais temperatura, pressão, viscosidade
Menos ou Diminuição	Diminuição quantitativa no parâmetro	Menos temperatura, pressão, viscosidade, vazão, nível
Além de	Aumento	Temperatura, pressão, nível
Parte De	Diminuição	Menos temperatura, pressão, vazão, falta de componente
Inversão	Oposto da intenção	Vazão invertida
Outro ou Em vez De	Substituição: ocorre outra atividade ou existe uma condição incomum	Alteração, falha, paralisação

Fonte: Adaptado Crawley e Tyler (2015).

Para o FMEA foram avaliados os aspectos de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) referentes a cada causa potencial de falha utilizando critérios previamente estabelecidos pela equipe. Os formulários desenvolvidos seguiram a estrutura proposta por Lucena (2018), já os critérios, foram uma adaptação da Norma NBR ABNT 17080 de 2023 que sugere a classificação de risco para o plano de segurança da água (Tabela 8).

A severidade deve ser entendida como a magnitude e quão danoso pode ser o risco caso ele ocorra. A ocorrência significa a probabilidade com que o evento perigoso ocorre atualmente no processo. Portanto, a ocorrência já é uma classificação do risco, se há ocorrência o risco é real, ao contrário de apenas um risco potencial, o qual pode vir a ocorrer. A detecção mostra qual o grau de facilidade de percepção do perigo, antes que ele ocorra, pelos instrumentos e métodos de controle do sistema.

Na condução da análise de risco, foram estabelecidos parâmetros específicos para a avaliação do produto e do processo nas soluções alternativas de abastecimento. Primeiramente, na avaliação das falhas no planejamento, na execução da captação, transporte e manuseio da água através do HAZOP, baseando-se nas não conformidades do processo em relação à operação ótima do sistema analisado.

Tabela 8 – Critérios de classificação de risco para SAA ou SAC

ESCALA DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIAS		
Probabilidade de ocorrências	Descrição	Peso
Quase certa	Espera-se que ocorra uma vez por dia	5
Muito provável	Vai acontecer provavelmente uma vez por semana	4
Provável	Vai ocorrer provavelmente uma vez por mês	3
Pouco provável	Pode ocorrer uma vez por ano	2
Raro	Pode ocorrer em situações excepcionais (uma vez em cinco anos)	1
ESCALA DE SEVERIDADE DE CONSEQUÊNCIAS		
Severidade das consequências	Descrição	Peso
Catastrófica	Potencial agravo à saúde para uma grande parte da população	5
Grande	Potencial agravo à saúde para uma pequena parte da população	4
Moderada	Potencialmente prejudicial para uma grande parte da população	3
Pequena	Potencialmente prejudicial para uma pequena parte da população	2
Insignificante	Sem impacto ou não detectável	1
ESCALA DE SEVERIDADE DE CONSEQUÊNCIAS		
Dificuldade de detecção	Descrição	Peso
Difícil	Dificuldade para a detecção do perigo	3
Médio	Moderado grau de dificuldade para a detecção do perigo	2
Fácil	Facilidade para a detecção do perigo	1

Fonte: Adaptada ABNT (2023).

Na segunda etapa foram avaliados os parâmetros do produto, destinados à avaliação dos riscos associados às falhas potenciais, conforme as especificações normativas e relacionadas à deterioração dos parâmetros de qualidade da água (FMEA), no transporte, tratamento, armazenamento e consumo. Posteriormente, serão calculados os níveis de prioridade de risco (NPR), por meio da multiplicação dos índices de severidade, ocorrência e detecção para em seguida serem classificados de acordo com a Tabela 9.

Todos os perigos foram ponderados com escores de severidade que variam de insignificante = 1, pequena = 2, moderada = 3, grande = 4, até catástrofe = 5, com escores de probabilidade de ocorrência variando de raro =1, pouco provável = 2, provável = 3, muito provável = 4, quase certo = 5 (ABNT, 2023), e com escores de dificuldade de detecção variando,

de fácil = 1, médio = 2 e difícil = 3 (Ogata, 2011). Posteriormente, de posse dos resultados, os perigos foram classificados conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Matriz de classificação de risco

Probabilidade de ocorrência	Severidade das consequências					Dificuldade de detecção
	Insignificante Escore: 1	Pequena Escore: 2	Moderada Escore:3	Grande Escore: 4	Catastrófica Escore: 5	
Quase certa Escore: 5	15	30	45	60	75	Difícil Escore: 3
Muito provável Escore: 4	12	24	36	48	60	
Provável Escore: 3	6	12	18	24	30	Médio Escore: 2
Pouco provável Escore: 2	4	8	12	16	20	
Raro Escore: 1	1	2	3	4	5	Fácil Escore: 1

Análise de risco

- Muito Alto: >45 necessidades de ação imediata
- Alto: 24 a 45 necessidade de especial atenção
- Médio: 12 a 18 necessidade de atenção
- Baixo: <8 controlável por meio de procedimentos de rotina

Observação: De acordo com a NBR ABNT 17.080/2023 – Se o risco for: Grande afetará mais do que 50% da população, se for risco moderado afetará de 10% a 50% da população e se for pequeno afetará menos do que 10% da população.

Fonte: Adaptado ABNT (2023).

As reuniões necessárias para a análise de risco foram agendadas com o consentimento de todos os participantes, sendo programadas para ocorrerem sem interrupções, a fim de maximizar a eficácia da avaliação. Todo o material documental necessário, incluindo tabelas de dados, gráficos e informações operacionais das SAC foi organizado antecipadamente para subsidiar o processo decisório dos especialistas. Assim, ao proceder a análise de risco os especialistas estavam munidos das informações indispensáveis aos processos decisórios de avaliação.

O grupo de especialistas foi orientado para que cada aspecto fosse debatido exaustivamente, até que um consenso, sobre cada escore, fosse alcançado. No entanto, quando não havia unanimidade o coordenador limitava o tempo para a tomada de decisão.

Adicionalmente, foram descritos os perigos identificados no FMEA de produto, os parâmetros empregados na configuração das colunas dos formulários incluíram o efeito da

falha, a causa subjacente, as medidas mitigadoras propostas e os escores atribuídos para a quantificação dos riscos associados.

O FMEA de produto foi baseado nos parâmetros mínimos de qualidade da água para soluções alternativas de abastecimento segundo a Portaria GM/MS nº 888 de 2021. Foram relacionados oito pontos principais citados a seguir:

- Alta concentração de CRL;
- Baixa concentração de CRL;
- Alta turbidez;
- Alta concentração de CRC;
- Alto pH;
- Baixo pH;
- Presença de Coliformes totais;
- Presença de *Escherichia coli*.

4.3.3 Definição das medidas de controle

As medidas de controle foram obtidas após os resultados das análises de riscos utilizadas no estudo e serão apresentadas nos resultados do trabalho. Elas foram apoiadas no princípio de múltiplas barreiras e nas boas práticas, dois fatores fundamentais para implementação do PSA em soluções alternativas de abastecimento.

O princípio de múltiplas barreiras constitui uma abordagem sistemática composta por diversas etapas dentro do sistema de abastecimento, onde se estabelecem procedimentos específicos para prevenir, reduzir, eliminar ou minimizar a contaminação da água. A legislação brasileira endossa este princípio, recomendando sua aplicação por meio de uma avaliação sistemática do sistema de abastecimento ou das soluções alternativas implementadas. Tal avaliação deve considerar o histórico das características das águas, as características físicas do sistema, as práticas operacionais adotadas e a qualidade da água distribuída.

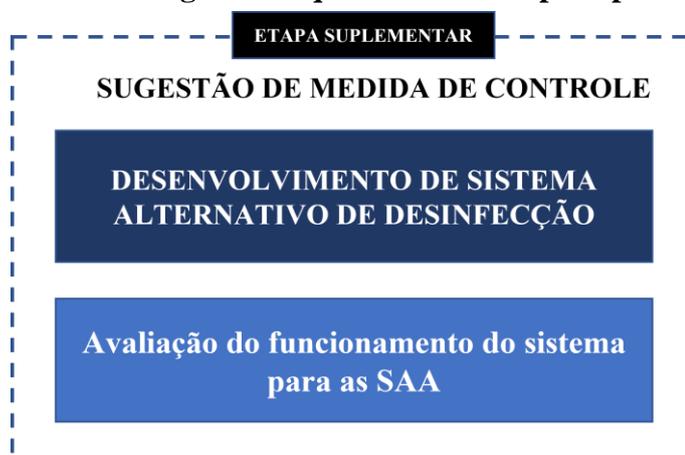
As boas práticas representam medidas de controle que asseguram a eficácia de cada uma das barreiras implementadas, com o intuito de mitigar riscos associados. Esses procedimentos são essenciais nas fases de concepção, projeto, construção e, crucialmente, durante a operação e manutenção dos sistemas de abastecimento. Ao adotar tais práticas, minimizam-se os riscos à saúde humana, garantindo a integridade e a segurança do fornecimento de água.

4.3.3.1 Desenvolvimento de sugestão medida de controle

Essa etapa foi desenvolvida como uma fase suplementar do estudo a qual resulta da avaliação dos resultados das medidas de controle propostas, após a realização da análise de risco de produto e processo das SACs, sendo assim esse estudo propõe uma sugestão de medida de controle, ou seja, uma solução para adequação de qualidade de água em regiões dispersas.

Dessa forma, foi desenvolvido um sistema de desinfecção de água para soluções alternativas de abastecimento, como mais uma opção de fácil operação para realização da inativação de microrganismos patogênicos na água. O desenvolvimento dessa etapa suplementar seguiu o fluxograma da Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma esquemático da etapa suplementar



Fonte: O autor (2024).

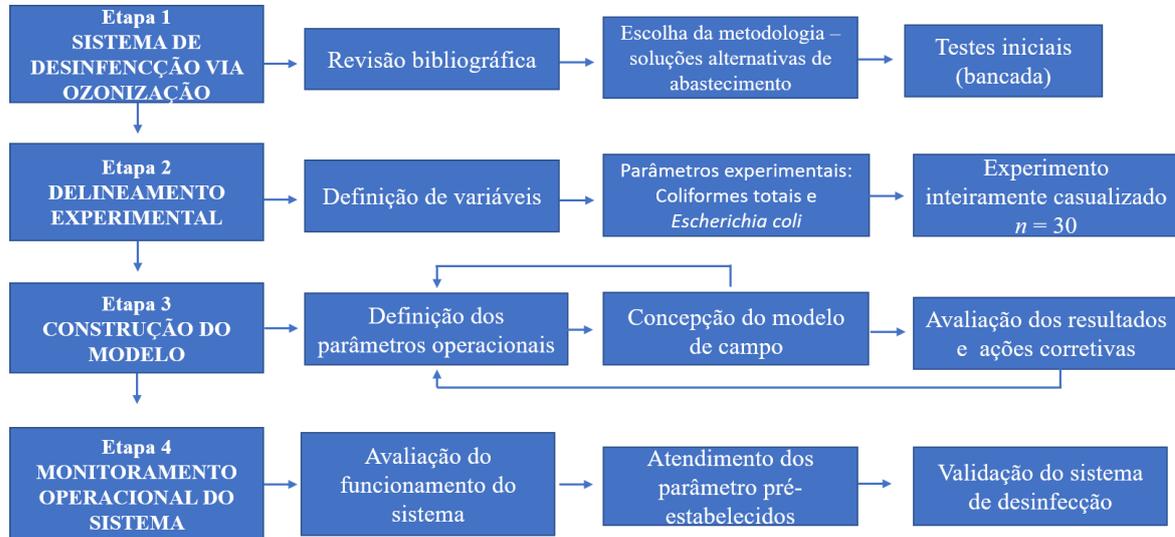
O fator preponderante para o desenvolvimento desse sistema foi a predominância de baixa qualidade microbiana nas águas provenientes de SACs. Isso foi demonstrado por meio de uma análise de risco, que apontou essa condição como uma das principais causas de doenças entre os consumidores, além de ser um dos aspectos mais desafiadores em termos de detecção e resolução.

4.3.3.2 Sistema compacto de desinfecção via ozonização

Nesse trabalho foi desenvolvido um sistema de desinfecção compacto para adequação microbiológica da qualidade das águas de SACs. Essa ferramenta pode auxiliar as comunidades na obtenção de água com segurança sanitária, além de desempenhar uma alternativa como

medida de controle proposta pelo PSA. O desenvolvimento desse sistema seguiu as etapas metodológicas segundo o fluxograma ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma das etapas metodológicas do desenvolvimento do sistema de desinfecção via ozonização



Fonte: O autor (2024).

- 1ª Etapa: Sistema de desinfecção via ozonização. Teve por finalidade avaliar a viabilidade da concepção do sistema através da realização de uma análise nos materiais bibliográficos, da tecnologia no Brasil e no mundo, como também, avaliar a possibilidade da utilização dessa técnica em soluções de abastecimento alternativa em localidades dispersas;
- 2ª Etapa: Delineamento experimental. Foram definidas as variáveis utilizadas, como também, quais métodos estatísticos melhor se adequavam à realização dos experimentos e à confiabilidade dos resultados obtidos;
- 3ª Etapa: Construção do modelo. Nessa etapa foi concebido o sistema dentro dos parâmetros de projeto, traçando ações corretivas, quando necessárias, a cada ciclo de avaliação, sendo posteriormente melhorado mediante experiência no seu próprio funcionamento;
- 4ª Etapa: Monitoramento operacional do sistema. O sistema foi acompanhado continuamente e seus resultados analisados e conforme os parâmetros pré-estabelecidos.

1º Etapa: Sistema de desinfecção via ozonização

A formulação do sistema em questão deve ser interpretada como uma alternativa adicional dentre os diversos modelos já estudados, cada qual apresentando suas características e propósitos distintos. Um exemplo notório é o modelo SALTA-z, desenvolvido pela Fundação Nacional de Saúde – Funasa (BRASIL, 2017b), especificamente orientado para prover soluções a pequenas comunidades cujas águas apresentam elevados níveis de ferro, manganês ou turbidez. Tais modelos são objeto de análise e avaliação global, visando a otimização do serviço prestado à população, incrementando sua eficácia e adequação às demandas específicas.

O sistema aqui proposto foi desenvolvido a partir de uma revisão de literatura em artigos científicos e livros sobre as principais técnicas de tratamento de água em localidades difusas, visando a escolha das melhores técnicas de tratamento, sempre prezando pela tecnologia e eficiência como relatado por Ekundayo *et al.* (2021), García-Ávila *et al.* (2021), Hasan *et al.* (2020) e Pooi; Ng (2018).

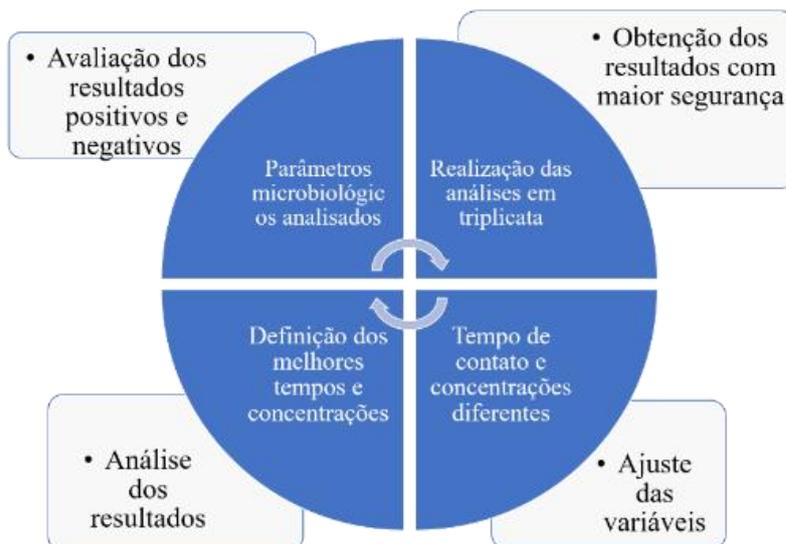
Os parâmetros microbiológicos mínimos de qualidade da água para o monitoramento de soluções alternativas de abastecimento foram selecionados segundo a Portaria GM/MS nº 888 de 2021, são eles: Coliformes totais e *Escherichia coli*. Foi levada em consideração, na escolha dos parâmetros, a infraestrutura necessária para a realização das análises, como também a praticidade de execução dessas análises em laboratório.

2º Etapa: Delineamento experimental

O desenvolvimento do sistema de desinfecção via ozonização de água passou por um delineamento experimental, com objetivo de nortear a quantidade de experimentos que seriam necessários e, posteriormente, para validação científica dos resultados obtidos.

O primeiro passo foi a definição dos parâmetros analisados, no caso, coliformes totais e *Escherichia Coli*. Posteriormente, realizava-se a análise microbiológica da água bruta e a desinfetada com ozônio, em seguida de posse dos resultados obtidos para cada fonte de água comparava-se os valores, por fim, ajustava-se o tempo de contato e concentrações até a obtenção do padrão desejado, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Planejamento experimental dos sistemas



Fonte: O autor (2024).

Esse estudo foi embasado na Lei dos Grandes Números (LGN) da estatística experimental e, ao final, o método que mais se adaptou à proposta do trabalho foi o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), devido à dificuldade de mensuração das variáveis que o experimento envolvia, repetição dos processos e eventos não previstos, situação corriqueira em experimentos de campo. O DIC utiliza conceitos de repetição e casualidade, o tratamento dos dados experimentais de forma inteiramente casual. Uma vantagem em relação às outras técnicas mais complexas é o número de repetições que deve ser realizado para cada parâmetro, que pode variar entre as diferentes variáveis analisadas. Por esse motivo, é classificado como um experimento desbalanceado (Stochero; Jacobi; Lúcio, 2020).

3ª Etapa: Construção do modelo

O trabalho foi desenvolvido no município de Campina Grande – PB, sendo o segundo maior centro urbano do estado. O clima do estado da Paraíba é caracterizado como seco e quente estando inserido na região semiárida do Brasil. Nesse contexto, dos 223 municípios do estado, 203 decretaram estado de calamidade em decorrência de eventos climáticos (secas prolongadas) de 2013 a 2018 (LUCENA, 2018; IBGE, 2021). O município de Campina Grande – PB, situado na mesorregião do Agreste, na região do Planalto da Borborema, a 7° 13'11" de latitude Sul e a 35° 52'31" de longitude Oeste, tem uma população pelo IBGE (2022) de 419.379 pessoas, das quais cerca de 18.004 são residentes na zona rural.

O sistema experimental foi montado na cidade de Campina Grande –PB, visto que oferecia melhores condições de operação e manutenção, facilitando o desenvolvimento do projeto. O equipamento foi instalado ao lado de um reservatório de água de chuva com capacidade de armazenamento de 2.000L, garantindo, assim, o fluxo de água coletada por meio de calhas. Além disso, também era coletada água de poço em reservatórios de 20L para realização dos testes, como também de água de açude. O ozonizador (Figura 18) foi fixado acima do nível do solo, protegido das intempéries e de modo a facilitar a sua operação.

Figura 18 – Instalação do Ozonizador



Fonte: O autor (2024).

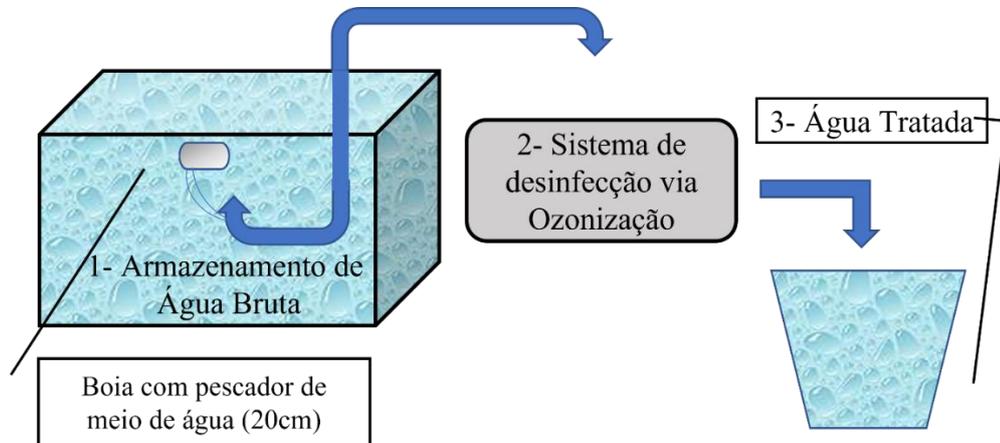
O equipamento em discussão constitui por um ozonizador com capacidade produtiva máxima de 3g, caracterizado por um consumo energético variando entre 6 a 10 kW.h/kgO₃h. Operacionalmente, o sistema mantinha um fluxo de ar estipulado em 5 L/min, alcançando potencialmente uma concentração de ozônio na água de aproximadamente 3,4 mg/L, com uma taxa de produção efetiva de 1g/h. Este dispositivo possui uma vida útil projetada para até 20.000 horas de funcionamento, sendo capaz de tratar eficientemente um volume de água de 20 L a cada 10 minutos, resultando em uma capacidade total de tratamento de 2.880 L/dia.

A Figura 19 apresenta o esquema simplificado do sistema de desinfecção via ozonização desenvolvido no trabalho. Este surge como uma opção para obtenção de água potável em localidades que empregam SACs, associado ou não a técnicas de tratamento, utilizando as mais diversas alternativas de coleta e reservação de água. Após o bombeamento para o primeiro reservatório (1) a água é bombeada de forma manual ou mecanizada para unidade de ozonização (2) e em seguida armazenada no tanque de reservação (3).

Esse sistema é baseado em uma técnica avançada de desinfecção. Além disso foi projetado para que, desde a captação e o consumo de água, seja evitada a reincidência de contaminações, sendo um exemplo, o sistema de coleta de água dos reservatórios com altura

subsuperficial e acompanhamento de nível (pescador superficial) para evitar a sucção de material sólidos tanto da superfície da água quanto do fundo do reservatório.

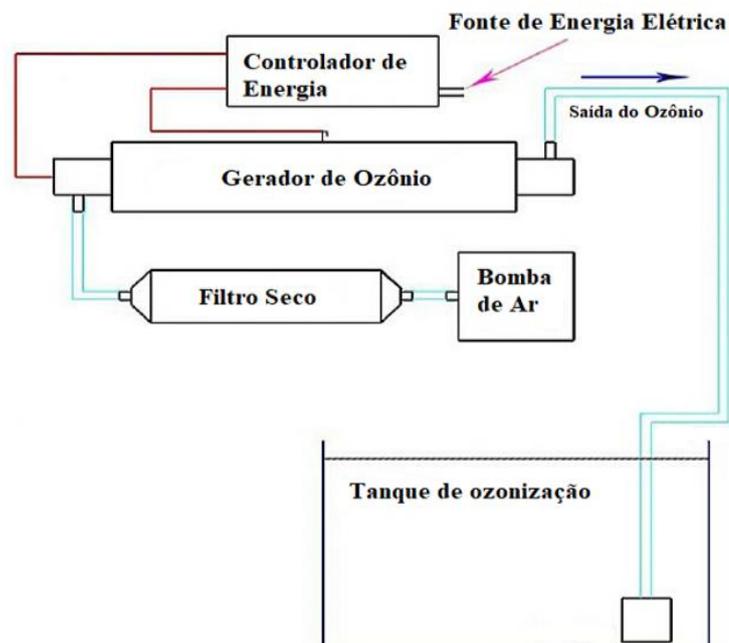
Figura 19 – Esquema o sistema de desinfecção via ozonização



Fonte: O autor (2024).

As vantagens desse sistema são a versatilidade e alta eficiência. No entanto, dentre as suas desvantagens, estão o alto custo devido à sua pouca utilização, a necessidade de mão de obra especializada para manutenção, a possibilidade de geração de alguns subprodutos e o curto tempo de vida na água devido à sua alta instabilidade. O detalhe das etapas e composição do sistema de ozonização são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Detalhamento do sistema de ozonização



Fonte: O autor (2024).

4ª Etapa: Monitoramento operacional do sistema

Com o propósito de aferir a eficiência do sistema de ozonização na remoção de microrganismos em SACs, foram realizados testes para três diferentes fontes: águas de cisternas, poços e açudes da zona rural do município de Campina Grande–PB. Sendo assim, as análises eram feitas com as águas brutas, utilizando uma concentração aproximada de 0,17mg.min/L de O₃ por um tempo de contato de 10 minutos, em temperatura média de aproximadamente de 25 °C, seguindo o proposto pela Portaria GM/MS nº 888 de 2021.

O sistema foi operado com o propósito de analisar sua evolução ao longo do tempo, além de realizar, de forma periódica, a coleta dos dados referentes aos parâmetros de avaliação. Algumas análises de parâmetros operacionais eram realizadas *in loco* com a utilização de equipamentos portáteis como por exemplo pH e temperatura, as quais eram utilizadas para acompanhar a eficiência do equipamento. Já as amostras dos testes microbiológicos (Coliformes totais e *Escherichia coli*) foram realizadas no laboratório de saneamento da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), a partir do teste de presença ou ausência de substrato cromogênico – COLILERT® (Figura 21).

Figura 21 – Análise de Coliformes totais e *Escherichia coli*



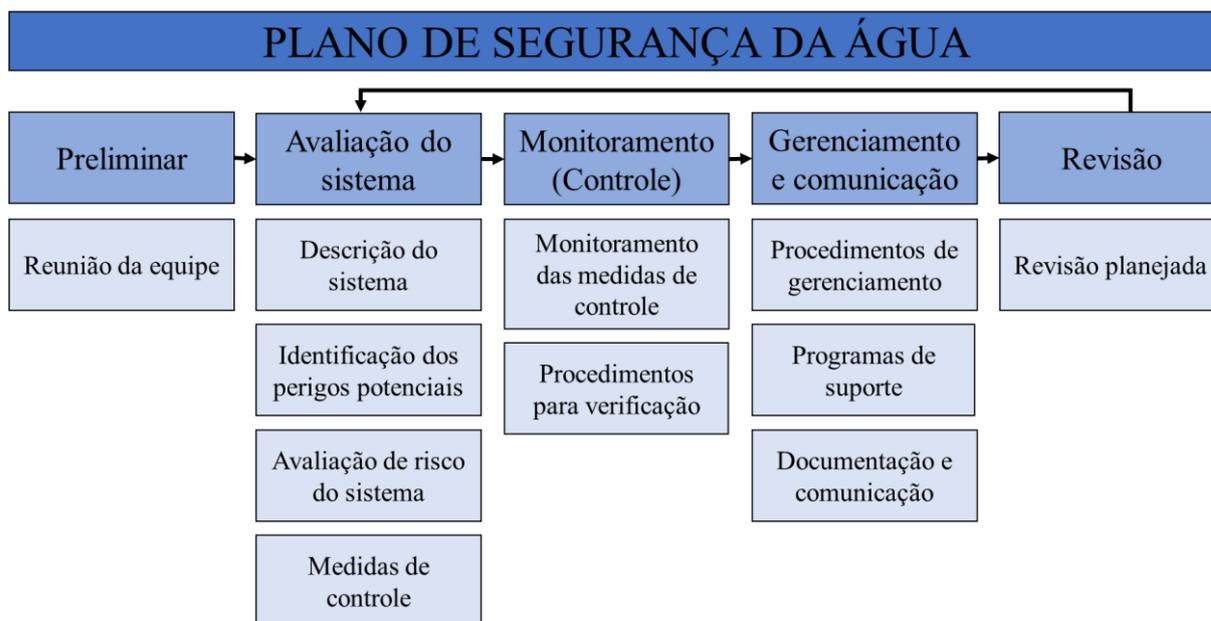
Fonte: O autor (2024).

O regime operacional do sistema de desinfecção foi caracterizado por sua execução em bateladas, com três ciclos diários agendados para às 05:30 h, 10:30 h e 17:50 h horas, tratando 20 litros de água por ciclo. Esta operação era mantida de forma contínua ao longo de um período de três a quatro meses. Durante este intervalo, avaliações eram conduzidas com frequência variando de uma a três vezes por semana, a fim de monitorar rigorosamente os parâmetros de desempenho. Os dados resultantes dessas análises eram sistematicamente registrados e acumulados para subsequente avaliação qualitativa e quantitativa, visando aferir a eficácia do processo e garantir a conformidade com os padrões estabelecidos pela norma.

4.4 Plano de Segurança da Água

O plano de segurança da água (PSA) foi desenvolvido a partir de uma simplificação do modelo proposto pela WHO (2022), tendo em vista que esse modelo contém 5 etapas para implementação do PSA (Figura 22), o que acaba por dificultar a sua aplicação em localidades dispersas pela sua complexidade.

Figura 22 – Passos para desenvolver o Plano de Segurança da Água



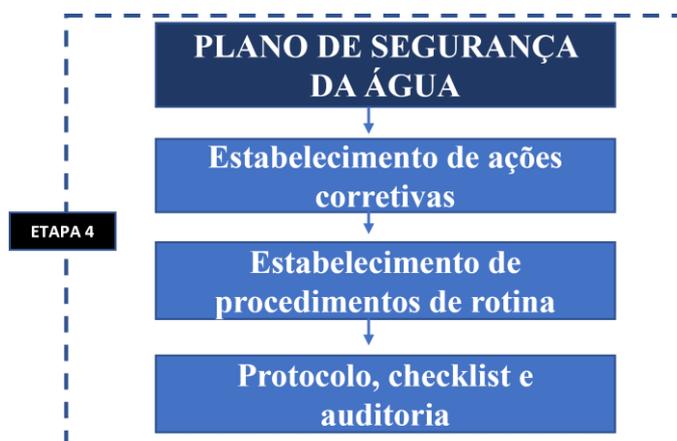
Fonte: WHO (2022).

Sendo assim, esse estudo propôs o estabelecimento de ações corretivas a partir dos resultados das análises de risco nas soluções alternativas de abastecimento, como também o

estabelecimento de procedimentos de rotinas nas SACs com a utilização de protocolos, checklist e auditorias periódicas.

Esse estudo propõe um PSA simplificado composto de três etapas: Estabelecimento de ações corretivas, a partir dos resultados das análises de risco, resultando no estabelecimento de procedimentos de rotina, protocolos, checklist e auditorias (Figura 23).

Figura 23 - Plano de segurança simplificado



Fonte: O autor (2024).

4.4.1 Estabelecimento de ações corretivas

As ações corretivas foram estabelecidas como resultado da análise de risco, HAZOP para o processo de abastecimento e FMEA para o produto. Elas foram elencadas no resultado do estudo como providências a serem utilizadas nas SAC como forma de controle do risco nos processos de captação, transporte, abastecimento, reservação e consumo de água em localidades dispersas.

4.4.2 Estabelecimentos de procedimentos de rotina

A partir das ações corretivas escolhidas, foram estabelecidos alguns procedimentos de rotinas para as SACs. Desta forma, para cada parâmetro avaliado foi proposto um procedimento de rotina para solucionar a problemática em questão, esses procedimentos foram elencados nas tabelas dos resultados do estudo. A exemplo, da implementação de cronogramas de inspeções e manutenção das partes componentes do abastecimento de água dessas localidades, medidas essas que auxiliam na detecção precoce de aumento de risco nas operações dos sistemas.

4.4.3 Protocolo, checklist e auditoria

Essa etapa traz os resultados alcançados no estudo, onde foi desenvolvido um protocolo de ações e recomendações práticas para soluções alternativas, o qual detalha, para cada etapa do processo de abastecimento de água uma medida de recomendação, quem é o responsável pela ação requerida, qual o período temporal recomendado para ser implementado e a descrição da atividade que deve ser realizada. Essas medidas são implementadas tanto para as etapas das SACs, como para as do PSA, são elas:

- Captação de água;
- Tratamento da água;
- Armazenamento;
- Distribuição;
- Monitoramento da qualidade;
- Educação e conscientização;
- Gestão e Governança;
- Planos de Contingência.

Outra proposição foi a implementação de Checklist simplificado dos procedimentos de segurança sanitária para SACs de acordo com os pontos críticos analisados. Desta forma, foram atribuídas três classificações para cada item avaliado: conforme, não conforme e não se aplica. Por fim, foi recomendada a execução de uma auditoria periódica consoante às etapas elencadas no resultado da pesquisa, sendo essa ferramenta primordial para avaliação dos efeitos das ações anteriores.

5 RESULTADOS

Foram utilizados dois tipos de análise de risco no trabalho, HAZOP para avaliar as diversas fontes de abastecimento em soluções alternativas e FMEA para avaliação do produto nessas condições. Os resultados obtidos a partir das reuniões com os especialistas serão apresentados a seguir.

5.1 Análise De Risco – Hazop De Processo

A análise HAZOP utiliza diagramas de processos para facilitar a avaliação. Posteriormente, determinam-se os “nós” que serão avaliados e cada nó recebe uma numeração que não se altera e é utilizada como referência até o final do estudo.

A primeira avaliação foi realizada para abastecimento de comunidades rurais via captação de água de chuva (Tabela 10). O processo de abastecimento nessas localidades revela vários desafios operacionais e de manutenção que podem afetar a segurança da água fornecida. Os resultados obtidos foram em torno das consequências e providências abordadas na análise de risco, as quais são fundamentais para garantir a potabilidade da água.

A partir da avaliação das consequências, falhas operacionais e de manutenção, chegou-se a três problemas mais recorrentes nessa fonte de abastecimento, são eles: contaminação e acúmulo de sedimentos, aumento do risco sanitário e interrupção do abastecimento.

As falhas na manutenção dos telhados, calhas e tubulações nessa fonte de abastecimento podem levar ao acúmulo de sedimentos nos reservatórios, resultando em um aumento da turbidez e o risco de contaminação microbiana da água. Isto não apenas compromete a qualidade da água, como também sobrecarrega o sistema de tratamento, se existente, necessitando de um maior ajuste na dosagem do desinfetante e resultando no aumento da possibilidade de geração de subprodutos.

A falta de tratamento convencional ou simplificado e de manutenção adequada dos processos, aumentam significativamente o risco sanitário, expondo a população aos agentes patogênicos. Além disso, as falhas na retirada manual ou mecânica da água dos reservatórios podem facilitar a propagação dessa contaminação, como também a utilização inadequada de baldes e bombonas sem o devido procedimento de higienização.

Por fim, as falhas nos sistemas mecanizados, como quebra de bombas ou falta de energia elétrica, podem causar interrupção no fornecimento de água, afetando diretamente a disponibilidade e o acesso à água potável para essas comunidades sendo necessário, nessa situação, recorrer a outra fonte abastecedora.

Nesse sentido, as providências mais recomendadas pela equipe avaliadora para essa fonte de abastecimento são: manutenção preventiva e corretiva do sistema, melhoria das operações e infraestrutura, educação e conscientização dos usuários e elaboração e implementação de um plano de ação.

É fundamental estabelecer e seguir um cronograma de inspeção e manutenção para todas as partes integrantes do sistema de captação e tratamento de água. Além das manutenções nas estações de tratamento, incluindo as limpezas periódicas das calhas, telhados e tubulações, em especial, nos períodos que antecedem as chuvas.

Vale salientar a importância da implementação de dispositivos para descarte das primeiras chuvas e instalação de peneiras e telas na etapa de captação, que previnem a entrada de contaminantes nas tubulações e reservatórios. Além disso, a recloração e a melhoria das operações anteriores ao reservatório são essenciais para garantir que os parâmetros de potabilidade sejam mantidos.

Outra providência inferida a partir da análise da Tabela 10 é a conscientização da população sobre o uso correto e manutenção dos reservatórios de água (caixas d'água e cisternas), baldes e bombonas, como também a elaboração e implementação de planos de ação para lidar com as falhas operacionais ou situações de emergência nessas comunidades, assegurando que medidas rápidas e efetivas possam ser tomadas para minimizar os riscos à saúde pública.

Tabela 10 – HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via captação de água de chuva

NÓ	PARÂMETROS	PALAVRAS-CHAVES	DESVIOS	CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	PROVIDÊNCIAS
1	Telhado	Menos	Menos manutenção no telhado.	Pouca ou ausência de manutenção corretiva e inspeção.	Acúmulo de sujeira no telhado.	Seguir cronograma de inspeções e manutenções; realização de manutenções corretiva.
2	Calha de coleta	Menos	Menos manutenção da calha de coleta.	Pouca ou ausência de limpeza da calha.	Acúmulo de sedimentos na calha	Seguir cronograma de inspeções e manutenções; manutenção preventiva e corretiva.
3	Tubulação de transporte	Menos	Menos limpeza na tubulação.	Falta de dispositivo de descarte das primeiras chuvas; Aumento da turbidez; aumento de cor; aumento da contaminação microbiana.	Transporte de material sedimentar para o tratamento ou reservação	Descarte das águas das primeiras chuvas; instalação de dispositivo de peneira e tela na tubulação; manutenção preventiva e corretiva.
4	Tratamento - Convencional	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva da estação; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.

Continua

Continuação

5	Tratamento – Simplificado	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva do sistema; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
6	Sem tratamento	Outro ou em vez de	Aumento do risco de água não potável.	Ausência de tratamento da água.	Fornecimento de água não potável.	Implementação de sistema de tratamento adequado de acordo com a classificação da água.
7	Reservatório - Cisterna	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação o microbiana.	Falta de manutenção.	Aumento na dosagem de cloro no reservatório; geração de subprodutos na água; maior tempo para sedimentação das partículas.	Recloração no reservatório; melhoria das operações anteriores.
8	Reservatório – Caixa d'água	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação o microbiana.	Falta ou mal uso da tampa de vedação da caixa; pouca manutenção periódica; falta de conscientização da população.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores; recusa ao consumo da água.	Manutenção preventiva e periódica da caixa; uso correto da tampa de vedação.
9	Baldes – Bombonas	Mais	Aumento do risco de contaminação o microbiana.	Utilização para outras finalidades; manipulação sem os devidos cuidados; acondicionamento incorreto.	Aumento do risco sanitário da água;	Utilização exclusiva para reservação e manipulação de água potável; limpeza periódica; acondicionamento em local adequado.
10	Retirada da água – Via Manual	Outro ou em vez de	Falha no processo de retirada de água.	Falta de desinfecção dos dispositivos da água; falta de padronização no processo de captação da água.	Aumento dos casos de gastroenterites nos consumidores; recusa do consumo da água; aumento da contaminação microbiana.	Padronização no sistema do processo de coleta de água; desinfecção periódica do sistema de coleta da água.
11	Retirada da água – Via Mecanizada	Outro ou em vez de	Falha no sistema de bombeamento.	Falta de manutenção nas bombas; quebra das bombas; falta de energia elétrica.	Interrupção do abastecimento; baixa vazão ou pressão da água.	Manutenção preventiva e periódica das bombas.

Fonte: O autor (2024).

A avaliação dos nós (4 ao 11) das Tabelas 10, 11, 12 e 13 mostrou resultados semelhantes para todas as soluções alternativas de abastecimento analisadas, visto que, nas fontes de abastecimento foram utilizadas técnicas de tratamento e reservação análogas, havendo apenas alterações em sua estruturação de ordenação, algumas tendo tratamento outras não, e na escolha do tipo de reservação.

A Tabela 11 detalha a análise de risco com a utilização do HAZOP para a solução alternativa de abastecimento de água em comunidades rurais utilizando captação subterrânea (poços). Esta análise é fundamental para identificar potenciais desvios que possam afetar a segurança e a eficácia da fonte. Foram elencadas as principais consequências após a análise do método. São elas: falhas no abastecimento e qualidade da água, risco sanitário aumentado, problemas de potabilidade e contaminação microbiana e desafios no manuseio e armazenamento da água.

O risco da interrupção do abastecimento é aumentado por falha na manutenção do sistema de bombeamento que pode resultar em deterioração da qualidade da água, provocando alteração dos indicadores sentinelas como aumento da turbidez, cor e presença de coliformes. As consequências desse risco sanitário aumentado podem levar a uma paralisação do processo de tratamento das águas por falhas nos sistemas convencionais e simplificados, sendo ainda pior na ausência de um tratamento, expondo a comunidade à água contaminada.

A falha na manutenção dos reservatórios, como cisternas e caixas d'água, eleva o risco dos parâmetros físico-químicos estarem fora dos padrões de potabilidade e o risco de contaminação microbiana (Filho, 2014; Marengo, 2008). Assim como, o uso inadequado de recipientes, como baldes e bombonas, para a retirada manual ou mecanizada da água aumenta significativamente a incidência de doenças gastrointestinais entre os consumidores.

Dentre as providências sugeridas é fundamental seguir um cronograma de inspeções e manutenções preventivas e corretivas para evitar a deterioração dos sistemas de captação, bombeamento e tratamento da água, bem como desenvolver e implementar planos de ação para lidar com falhas nos sistemas de tratamento e garantir a continuidade do fornecimento de água segura e potável.

O processo de capacitação da comunidade sobre a importância do uso correto das infraestruturas de água também é essencial para mitigar os riscos identificados e promover práticas sustentáveis de gestão da água. Bem como, adotar padrões rigorosos para o processo de coleta de água e desinfecções periódicas dos dispositivos de coleta utilizados.

Tabela 11 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais captação de água subterrânea (poços)

NÓ	PARÂMETROS	PALAVRAS-GUIAS	DESVIOS	CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	PROVIDÊNCIAS
12	Captação da água – via bombeamento ou manual	Outro ou em vez de	Paralisação ou falha na manutenção do sistema de bombeamento	Ausência ou pouca inspeção e manutenção preventiva regular.	Falha no abastecimento; Baixa qualidade da água.	Seguir cronograma de inspeções e manutenções; Realização de manutenções preventivas e corretivas.
13	Transporte da água bruta	Menos	Menos pressão na tubulação, falhas nas tubulações ou mangueiras.	Instalação inadequada das tubulações; ausência ou pouca manutenção.	Falha no abastecimento; baixa vazão; baixa qualidade da água.	Instalação correta das tubulações; seguir cronograma de inspeções e manutenções; manutenção corretiva.
4	Tratamento - Convencional	Outro ou em vez de	Falha ou paralisação no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva da estação; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
5	Tratamento – Simplificado	Outro ou em vez de	Falha ou paralisação no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva do sistema; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
6	Sem tratamento	Outro ou em vez de	Aumento do risco de água não potável.	Ausência de tratamento da água.	Fornecimento de água não potável.	Implementação de sistema de tratamento adequado de acordo com a classificação da água.
7	Reservatório - Cisterna	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta de manutenção.	Aumento na dosagem de cloro no reservatório; geração de subprodutos na água; maior tempo para sedimentação das partículas.	Recloração no reservatório; melhoria das operações anteriores.
8	Reservatório – Caixa d'água	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta ou mal uso da tampa de vedação da caixa; pouca manutenção periódica; falta de conscientização da população.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores; recusa ao consumo da água.	Manutenção preventiva e periódica da caixa; uso correto da tampa de vedação.

Continua

Continuação

9	Baldes – Bombonas	Mais	Aumento do risco de contaminação microbiana.	Utilização para outras finalidades; manipulação sem os devidos cuidados; acondicionamento incorreto.	Aumento do risco sanitário da água;	Utilização exclusiva para reservação e manipulação de água potável; limpeza periódica; acondicionamento em local adequado.
10	Retirada da água – Via Manual	Outro ou em vez de	Falha no processo de retirada de água.	Falta de desinfecção dos dispositivos da água; falta de padronização no processo de captação da água.	Aumento dos casos de gastroenterites nos consumidores; recusa do consumo da água; aumento da contaminação microbiana.	Padronização no sistema do processo de coleta de água; desinfecção periódica do sistema de coleta da água.
11	Retirada da água – Via Mecanizada	Outro ou em vez de	Falha no sistema de bombeamento	Falta de manutenção nas bombas; quebra das bombas; falta de energia elétrica.	Interrupção do abastecimento; baixa vazão ou pressão da água.	Manutenção preventiva e periódica das bombas.

Fonte: O autor (2024).

Uma das fontes que apresenta a maior segurança sanitária para a população é o abastecimento via rede de distribuição, presente de forma pontual em algumas áreas rurais. Nessas circunstâncias, excepcionalmente são implementadas extensões de rede para o atendimento que uma ou mais comunidades. Sendo assim, é relevante destacar que, frequentemente, estas redes estão sujeitas a interrupções no fornecimento devido à sua localização nas extremidades do sistema (ponta seca).

Dessa forma, as regiões afetadas, habitualmente recorrem a outras soluções alternativas para utilizar no seu abastecimento de forma suplementar, durante períodos de inoperância da rede. Esta prática comum, culmina na mistura de águas provenientes de fontes diversas nos reservatórios, configurando um cenário complexo para a gestão da qualidade hídrica.

A partir da análise dos nós e desvios atribuídos na Tabela 12 foram identificadas as consequências mais recorrentes nessa fonte de abastecimento. São elas: intermitência e falha no abastecimento, riscos sanitários aumentados, contaminação de reservatórios e problemas no manuseio e armazenamento de água.

As falhas no processo de abastecimento causam intermitência na rede, geralmente são resultantes da negligência no processo de manutenção das partes constituintes do sistema, pelo baixo retorno econômico dessas localidades para as companhias de saneamento, causando diminuição ou interrupção temporária do abastecimento. Essas falhas também podem ser

localizadas no processo de tratamento convencional ou simplificado, sendo capazes de gerar uma diminuição do residual de cloro livre na água e elevando o risco sanitário.

Os reservatórios e recipientes de manuseio da água são outro ponto de falha preponderante. Segundo a avaliação da Tabela 12, as faltas mais recorrentes observadas são: manutenção inadequada nos reservatórios, uso impróprio de baldes e bombonas, falhas nos processos de retirada da água, problemas como o uso inadequado das tampas e ausência de conscientização da população. Esses são perigos recorrentes que podem elevar os parâmetros físico-químicos para fora do padrão de potabilidade e aumentar o risco de contaminação microbiana dessas localidades.

A Tabela 12 apresenta também, sugestões de providências para redução de risco, como por exemplo, a melhoria da infraestrutura e manutenção, a manutenção e planos de contingência para estações de tratamento, a educação e conscientização da população e a padronização e desinfecção dos processos de coleta de água. Essas medidas visam o aumento da segurança sanitária dessa fonte de abastecimento, ao mesmo tempo em que propõem que a população tenha a sua parcela de contribuição na eficiência do sistema de abastecimento de água.

Tabela 12 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via rede de abastecimento

NÓ	PARÂMETROS	PALAVRAS-CHAVES	DESVIOS	CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	PROVIDÊNCIAS
14	Abastecimento via rede de distribuição	Menos	Menos ou pouca água na rede de abastecimento	Pouca manutenção da rede; localização nas pontas das redes ou zonas de baixa pressão.	Falta ou pouca vazão de água; intermitência de abastecimento; baixo residual de cloro livre; incentivo à mistura das águas por falta de abastecimento.	Implementação da rede de distribuição de maneira efetiva; realização de manutenções preventivas e corretiva.
4	Tratamento - Convencional	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva da estação; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
5	Tratamento - Simplificado	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva do sistema; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.

Continua

Continuação

7	Sem tratamento	Outro ou em vez de	Aumento do risco de água não potável.	Ausência de tratamento da água.	Fornecimento de água não potável.	Implementação de sistema de tratamento adequado de acordo com a classificação da água.
8	Reservatório - Cisterna	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta de manutenção.	Aumento na dosagem de cloro no reservatório; geração de subprodutos na água; maior tempo para sedimentação das partículas.	Recloração no reservatório; melhoria das operações anteriores.
9	Reservatório – Caixa d'água	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta ou mal uso da tampa de vedação da caixa; pouca manutenção periódica; falta de conscientização da população.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores; recusa ao consumo da água.	Manutenção preventiva e periódica da caixa; uso correto da tampa de vedação.
10	Baldes – Bombonas	Mais	Aumento do risco de contaminação microbiana.	Utilização para outras finalidades; manipulação sem os devidos cuidados; acondicionamento incorreto.	Aumento do risco sanitário da água;	Utilização exclusiva para reservação e manipulação de água potável; limpeza periódica; acondicionamento em local adequado.
11	Retirada da água – Via Manual	Outro ou em vez de	Falha no processo de retirada de água.	Falta de desinfecção dos dispositivos da água; falta de padronização no processo de captação da água.	Aumento dos casos de gastroenterites nos consumidores; recusa do consumo da água; aumento da contaminação microbiana.	Padronização no sistema do processo de coleta de água; desinfecção periódica do sistema de coleta da água.

Fonte: O autor (2024).

O abastecimento de comunidades rurais via captação direta de manancial superficial (rios, nascentes e reservatórios) configura-se uma fonte de obtenção de água ainda comum em comunidades isoladas, às vezes utilizada regularmente, mas por convenção popular é mais adequada em situações críticas onde as outras soluções alternativas não são suficientes para o

atendimento da demanda. Essa fonte foi analisada pela Tabela 13 com a identificação dos potenciais desvios que possam comprometer a segurança e eficácia da solução.

As consequências mais relatadas ao analisar a Tabela 13 foram as seguintes: deterioração da qualidade da água, falhas no transporte da água bruta, riscos sanitários aumentados por falhas de tratamento, contaminação em reservatórios e riscos associados e problemas no armazenamento e retirada de água.

A deterioração da qualidade da água ocorre principalmente pela mistura de água bruta com águas tratadas, podendo levar ao aumento da turbidez, cor e presença de coliformes. Essa mistura, muitas vezes, é a principal causa da deterioração do recurso, mas, frequentemente, a população fica sujeita a esse caminho devido à falta de manutenção ou instalação inadequada do sistema que resultam em vazamentos e rompimentos das tubulações, provocando uma situação de vulnerabilidade social.

Os problemas operacionais nos sistemas de tratamento convencional e simplificado, a negligência na manutenção de reservatórios e a utilização de bombonas e baldes foram destacados como os principais fatores de aumento do risco sanitário dessa solução alternativas, resultando em desvios dos padrões físico-químicos e microbiológicos de potabilidade.

Desse modo, as providências para redução de risco mais recorrentes apontadas na Tabela 13 foram as seguintes: tratamento prévio da água, manutenção e inspeção de infraestrutura, melhorias nos sistemas de tratamento, gestão de reservatórios e educação comunitária e padronização da desinfecção dos processos de coleta.

Essas providências têm a função de garantir a segurança dos parâmetros mínimos de qualidade da água para essa solução alternativa de abastecimento e evitar a recontaminação da água após o processo de tratamento, utilizando gestão e educação para os usuários.

Tabela 13 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via captação direta de manancial superficial (rios, nascentes e reservatórios)

NÓ	PARÂMETROS	PALAVRAS-CHAVES	DESVIOS	CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	PROVIDÊNCIAS
15	Captação de água bruta	Mais	Piora ou aumento dos indicadores de qualidade de água.	Captação mecanizada ou manual de água bruta.	Baixa qualidade da água; Aumento da turbidez, cor e coliformes na água;	Realização do tratamento da água antes da etapa de reservação.

Continua

Continuação

16	Transporte da água bruta	Menos	Menos pressão na tubulação, falhas nas tubulações ou mangueiras.	Instalação inadequada das tubulações; ausência ou pouca manutenção.	Falha no abastecimento; baixa vazão; baixa qualidade da água.	Instalação correta das tubulações; seguir cronograma de inspeções e manutenções; manutenção corretiva.
4	Tratamento - Convencional	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva da estação; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
5	Tratamento – Simplificado	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva do sistema; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
6	Sem tratamento	Outro ou em vez de	Aumento do risco de água não potável.	Ausência de tratamento da água.	Fornecimento de água não potável.	Implementação de sistema de tratamento adequado de acordo com a classificação da água.
7	Reservatório - Cisterna	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta de manutenção.	Aumento na dosagem de cloro no reservatório; geração de subprodutos na água; maior tempo para sedimentação das partículas.	Recloração no reservatório; melhoria das operações anteriores.
8	Reservatório – Caixa d'água	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta ou mal uso da tampa de vedação da caixa; pouca manutenção periódica; falta de conscientização da população.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores; recusa ao consumo da água.	Manutenção preventiva e periódica da caixa; uso correto da tampa de vedação.
9	Baldes – Bombonas	Mais	Aumento do risco de contaminação microbiana.	Utilização para outras finalidades; manipulação sem os devidos cuidados; acondicionamento incorreto.	Aumento do risco sanitário da água;	Utilização exclusiva para reservação e manipulação de água potável; limpeza periódica; acondicionamento em local adequado.

Continua

Continuação

10	Retirada da água – Via Manual	Outro ou em vez de	Falha no processo de retirada de água.	Falta de desinfecção dos dispositivos da água; falta de padronização no processo de captação da água.	Aumento dos casos de gastroenterites nos consumidores; recusa do consumo da água; aumento da contaminação microbiana.	Padronização no sistema do processo de coleta de água; desinfecção periódica do sistema de coleta da água.
11	Retirada da água – Via Mecanizada	Outro ou em vez de	Falha no sistema de bombeamento	Falta de manutenção nas bombas; quebra das bombas; falta de energia elétrica.	Interrupção do abastecimento; baixa vazão ou pressão da água.	Manutenção preventiva e periódica das bombas.

Fonte: O autor (2024).

A técnica de abastecimento de água via caminhão-pipa regulamentado ou autônomo é uma das últimas opções de fonte de abastecimento utilizadas nas zonas rurais, visto que é necessário o dispêndio de recursos financeiros, podendo ser do poder público ou dos consumidores privados. Essa solução é amplamente utilizada nessas regiões em situação de emergência, geralmente em períodos de estiagem prolongada.

Essa fonte de abastecimento pode fornecer água de qualidade a população quando todos os cuidados sanitários são seguidos, como, por exemplo, a utilização de um veículo transportador inspecionado pela vigilância municipal; a água transportada for devidamente tratada em uma estação de tratamento para essa finalidade; os profissionais responsáveis pelo transporte recebam o treinamento para esse serviço e; as autoridades se façam presentes para a fiscalização dessa atividade.

A partir dos resultados observados na Tabela 14, após a análise de risco dessa fonte de abastecimento, foram identificadas as principais consequências dos desvios dessa atividade. São elas: contaminação da água durante o abastecimento, riscos de contaminação durante o transporte e falhas no abastecimento dos reservatórios.

Os riscos de falhas são aumentados quando a água é obtida de um veículo transportador não autorizado para a realização da atividade, uma vez que não há a garantia de um controle da origem da água, sendo comum o não cumprimento dos protocolos de abastecimento, como o uso adequado das mangueiras, manutenção dos tanques e treinamento de operadores para desempenhar à função.

As sugestões que podem ser extraídas da avaliação dos resultados da Tabela 14 são: adesão estrita aos protocolos de abastecimento, manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos e treinamento e capacitação dos operadores, sendo crucial seguir essas

recomendações para a melhoria e segurança do processo de aquisição de água via veículo transportador.

Tabela 14 - HAZOP do abastecimento em comunidades rurais via caminhão-pipas regulamentados ou autônomos

NÓ	PARÂMETROS	PALAVRAS-GUIAS	DESVIOS	CAUSAS	CONSEQUÊNCIAS	PROVIDÊNCIAS
17	Abastecimento do caminhão (reservatório de água tratada)	Menos	Menos da qualidade da água; menos vazão no abastecimento;	Descumprir o protocolo de abastecimento do caminhão; utilização inadequada das mangueiras de abastecimento;	Contaminação da água; aumento da turbidez, cor e coliformes na água; aumento de risco de necessidade de recloração da água.	Seguir o protocolo de abastecimento dos caminhões; seguir cronograma de inspeções e manutenções; realização das manutenções periódicas;
18	Transporte da água	Menos	Menos segurança sanitária da água; falha na manutenção do tanque.	Transporte da água em tanque com procedência duvidosa; falha na limpeza do tanque.	Aumento do risco de contaminação da água; aumento da turbidez, cor e coliformes na água.	Seguir cronograma de inspeções e manutenções; manutenção preventiva e corretiva.
19	Abastecimento de reservatório	Outro ou em vez de	Falha no abastecimento; Falha no protocolo de abastecimento.	Manipulação incorreta da mangueira de abastecimento; falta de treinamento.	Contaminação da água; Aumento da turbidez, cor e coliformes na água;	Seguir o protocolo de abastecimento; manutenção preventiva e corretiva regular dos equipamentos necessários para tal atividade.
4	Tratamento - Convencional	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva da estação; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
5	Tratamento - Simplificado	Outro ou em vez de	Falha ou paralização no processo de tratamento da água.	Problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de água.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores.	Manutenção preventiva e corretiva do sistema; elaboração e implementação de plano de ação para essas situações.
6	Sem tratamento	Outro ou em vez de	Aumento do risco de água não potável.	Ausência de tratamento da água.	Fornecimento de água não potável.	Implementação de sistema de tratamento adequado de acordo com a classificação da água.
7	Reservatório - Cisterna	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta de manutenção.	Aumento na dosagem de cloro no reservatório; geração de subprodutos na água; maior tempo para sedimentação das partículas.	Recloração no reservatório; melhoria das operações anteriores.

Continua

Continuação

8	Reservatório – Caixa d'água	Mais	Aumento do risco dos indicadores físico-químicos de potabilidade estarem fora do padrão; aumento do risco de contaminação microbiana.	Falta ou mal uso da tampa de vedação da caixa; pouca manutenção periódica; falta de conscientização da população.	Aumento do risco sanitário da água; contaminação dos consumidores; recusa ao consumo da água.	Manutenção preventiva e periódica da caixa; uso correto da tampa de vedação.
9	Baldes – Bombonas	Mais	Aumento do risco de contaminação microbiana.	Utilização para outras finalidades; manipulação sem os devidos cuidados; acondicionamento incorreto.	Aumento do risco sanitário da água;	Utilização exclusiva para reservação e manipulação de água potável; limpeza periódica; acondicionamento em local adequado.
10	Retirada da água – Via Manual	Outro ou em vez de	Falha no processo de retirada de água.	Falta de desinfecção dos dispositivos da água; falta de padronização no processo de captação da água.	Aumento dos casos de gastroenterites nos consumidores; recusa do consumo da água; aumento da contaminação microbiana.	Padronização no sistema do processo de coleta de água; desinfecção periódica do sistema de coleta da água.
11	Retirada da água – Via Mecanizada	Outro ou em vez de	Falha no sistema de bombeamento.	Falta de manutenção nas bombas; quebra das bombas; falta de energia elétrica.	Interrupção do abastecimento; baixa vazão ou pressão da água.	Manutenção preventiva e periódica das bombas.

Fonte: O autor (2024).

5.2 Análise de risco – FMEA de produto

Na análise FMEA de produto “água em soluções alternativas de abastecimento”, foram considerados oito perigos para avaliação dos riscos mais preponderantes (Tabela 15). Os critérios de ponderação seguiram as recomendações da ABNT NBR 17.080/2023, que trata das diretrizes para implementação de plano de segurança da água, as quais já foram detalhadas na metodologia.

Tabela 15 – Tabela FMEA de produto

PERIGO	EFEITO	CAUSA	S	O	D	NPR	MEDIDAS MITIGADORAS
Alta concentração de CRL	Intoxicação (diarreia), bronquite, asma, irritação das membranas mucosas, eczemas	Falha no processo de desinfecção	4	3	2	24	Utilização de dosagens recomendadas de desinfetante

Continua

Continuação

Baixa concentração de CRL	Aumento da probabilidade de presença de organismos patogênicos	Deficiência no sistema de cloração, falta de manutenção dos tanques e reservatórios, presença de substâncias redutoras	5	3	2	30	Manutenção dos tanques (pipas) e reservatórios, utilização de dosagens recomendadas de desinfetante
Alta turbidez	Aspecto desagradável e interferência na desinfecção	Aumento de sólidos suspensos no manancial, falta do processo de clarificação	4	3	2	24	Implementação das operações unitárias de clarificação
Alta concentração de CRC	Odor e sabor característicos, irritação das membranas mucosas, dos olhos e da garganta.	Alta concentração de nitrogênio amoniacal ou falta de manutenção nos tanques (pipas) e/ou reservatórios	3	2	2	12	Remoção de nitrogênio amoniacal ou manutenção dos tanques (pipas) ou reservatórios
Alto pH	Influência nos processos unitários, incrustação no tanque (pipas) e reservatório, comprometimento do processo de desinfecção.	Ausência de processo para correção do pH.	3	2	2	12	Utilização de substância ácida para diminuição do pH.
Baixo pH	Agressividade da água no tanque (pipas) e reservatório, influência nos processos unitários, irritação nos olhos, na pele e nas mucosas.	Ausência de processo para correção do pH.	3	2	2	12	Utilização de substâncias básicas (cal).
Presença de coliformes totais	Menor integridade do sistema por solução alternativa, aumento da probabilidade de presença de organismos patogênicos.	Falha na desinfecção, falta de manutenção no tanque e reservatório, grande quantidade de matéria orgânica na água, estagnação da água.	3	4	3	36	Manutenção dos tanques (pipas) e reservatórios, recloração nos reservatórios.
Presença de <i>Escherichia coli</i>	Indicador de contaminação fecal na água, infecções do trato urinário e intestinal.	Falha na desinfecção, falta de manutenção no tanque (pipa) e reservatório, grande quantidade de matéria orgânica na água, estagnação da água.	5	3	3	45	Manutenção da integridade dos tanques (pipas) e reservatórios, recloração nos reservatórios.

Fonte: O autor (2024).

Conforme a Tabela 15 do formulário FMEA de produto, o escore de severidade atribuído ao perigo da alta concentração de CRL foi 4, uma vez que a ocorrência desse perigo resulta no aumento da probabilidade de intoxicação, diarreia, bronquite, entre outros, que podem causar efeitos graves à saúde humana. Ao escore da ocorrência foi atribuído o valor 3, já que é provável que aconteça, principalmente em soluções alternativas de abastecimento, nas quais a dosagem do cloro é feita de maneira rudimentar. A detecção teve um peso 2, pois a forma de medição é simples, com a utilização de equipamentos usuais para técnicos que trabalham nessa área. O NPR resultante do produto entre os escores foi de 24.

O perigo de baixa concentração de CRL recebeu escore de severidade igual a 5, já que pode ter consequências de efeitos graves à saúde com o aumento da probabilidade de contrair uma doença de veiculação hídrica pela água. À ocorrência, por se tratar de situação recorrente, principalmente nas análises de soluções alternativas, foi atribuído o escore 3. Já a detecção obteve escore 2, por apresentar situação similar à da alta concentração de CRL. Ao final, foi calculado o NPR para a baixa concentração de CRL e foi obtido valor o 30.

Seguindo na análise de risco de produto para o perigo de alta turbidez na água, a severidade obteve o escore 4, pois além de interferir no processo de desinfecção, é um indicador de probabilidade de ocorrência de protozoários e outros microrganismos, podendo causar efeitos severos e/ou agudos à saúde humana. À ocorrência foi atribuído o valor 3, pois é provável a sua detecção em águas com pouco ou nenhum tratamento, situação recorrente em soluções alternativas. A detecção foi considerada 2, uma vez que a faixa de regulamentação da portaria é possível ser analisada com o auxílio de equipamento simples. O número prioritário de risco foi estimado em 24 (Tabela 15).

Para a alta concentração de CRC foi atribuída severidade 3, porque esse indicador tem uma capacidade moderada de causar problemas à saúde humana, e potencial de gravidade de leve à moderado e não sendo persistentes com o tempo, pois o CRC possui um poder oxidativo bem menor do que o CRL. Para a ocorrência, foi atribuído o escore 2, já que é pouco provável que o evento ocorra. Para a detecção foi atribuído escore 2, uma vez que o método de determinação do CRC é similar ao do CRL, sendo necessária a utilização de aparelhagem simples. A multiplicação dos escores resultou em um NPR de 12.

Seguindo na análise de risco de produto, o alto pH foi mais um perigo avaliado, sendo atribuído à sua severidade valor 3, sabendo que, o pH tem influência nos processos unitários e pode favorecer ou dificultar o processo de desinfecção da água com a utilização de cloro, auxiliando na inibição de formação de CRC, mantendo o maior poder desinfectante da água. A ocorrência obteve escore 2, uma vez que é pouco provável o acontecimento desse evento, por

volta de uma vez ao ano. À detecção foi atribuído o escore 2, pois para a sua medição é necessário um equipamento de simples utilização. As considerações sobre os escores levaram a um NPR de 12.

Para o perigo de baixo pH, o valor atribuído à severidade foi 3, mesmo considerando o favorecimento de corrosão de tubulações metálicas, bombas e tanques, contribuindo assim, para redução do tempo de vida útil desses elementos, no entanto, o pH baixo acelera o processo de desinfecção da água. O escore da ocorrência foi 2, visto que é pouco provável o seu acontecimento. À detecção foi atribuído o escore 2, pois para a sua medição é necessário um equipamento de simples utilização. Sendo assim, o resultado do NPR foi 12.

Para o perigo de presença de coliformes totais, o escore de severidade foi 3, pois há um potencial de agravo de uma parte da população, mesmo não sendo compostos em sua totalidade por organismos patogênicos, são um bom indicador das condições sanitárias da água e, particularmente, da integridade do sistema de abastecimento. A ocorrência obteve escore 4, visto que é muito provável que esse cenário acontece, principalmente se tratando de soluções alternativas de abastecimento que têm um cuidado deficiente. Para a detecção foi atribuído o escore 3, pois sua determinação requer um maior cuidado com relação à preservação e contaminação das amostras, sendo necessária a utilização de mão de obra com maior qualificação e investimento em material de alto valor econômico. O NPR resultante foi de 36 (Tabela 15).

Ao final, foi analisado o perigo da presença de *Escherichia coli* na água, sendo atribuído o escore 5 para severidade, por ser um indicador que confirma a presença de microrganismos associados à contaminação fecal, conseqüentemente, aumentando o risco de trazer agravos significativos à saúde dos consumidores. À ocorrência foi atribuído o escore 3, por ser uma situação provável de acontecer. A detecção obteve escore 3, por motivos análogos aos atribuídos na análise do indicador coliformes totais, visto que, ambos têm o mesmo processo de determinação. O NPR foi 45.

Conforme delineado na metodologia, a Tabela 16 foi ordenada para classificar os percentuais de influência de cada risco individual em relação ao total para análise de produto das soluções alternativas de abastecimento. Assim, o risco associado à presença de *Escherichia coli* emergiu como predominante, representando 23,07% do risco total, sendo classificado como risco alto necessitando de especial atenção. Este resultado era esperado, dada a associação direta deste indicador com as condições sanitárias da água, devido à ligação direta desse perigo com a presença de contaminação fecal nas águas, o que pode levar o consumidor ao desenvolvimento de quadros de debilidade severa na sua saúde.

Tabela 16 – Resultado da classificação riscos individuais para o FMEA de produto

PERIGO	NPR	PORCENTAGEM	CLASSIFICAÇÃO DE RISCO
Presença de <i>Escherichia coli</i>	45	23,07%	ALTO
Presença de coliformes totais	36	18,46%	ALTO
Baixa concentração de CRL	30	15,38%	ALTO
Alta turbidez	24	12,30%	ALTO
Alta concentração de CRL	24	12,30%	ALTO
Alta concentração de CRC	12	6,15%	MÉDIO
Alto pH	12	6,15%	MÉDIO
Baixo pH	12	6,15%	MÉDIO

Fonte: O autor (2024).

Em segundo, a presença de coliformes totais, representando 18,46% do risco, refletindo problemas de estanqueidade dos sistemas, mesmo que não indique uma contaminação patogênica necessariamente, podendo comprometer gravemente a saúde do consumidor. Em terceiro foi pontuada a baixa concentração de Cloro Residual Livre (CRL), demonstrando a ausência de barreiras de proteção residual contra novas contaminações da água. Dessa forma, eles foram classificados como de alto risco, visto que necessitam de uma atenção especial.

Em quarto, a alta turbidez e alta concentração de cloro residual livre (CRL) com 12,30%, sendo a turbidez um importante indicador sentinela da quantidade de material particulado em suspensão presente na água e o CRL um indicador que acima do VMP pode causar intoxicação e a recusa do consumo da água pelo seu sabor. Os dois obtiveram a classificação de risco alta por necessitarem de uma atenção especial.

E por último, alta concentração de cloro residual combinado (CRC), alto pH e baixo pH obtiveram 6,15% do risco total, demonstrando um risco menor para a saúde humana quando comparado com os outros perigos analisados, sendo classificados como risco médio por necessitarem de atenção.

5.3 Monitoramento operacional do sistema de ozonização

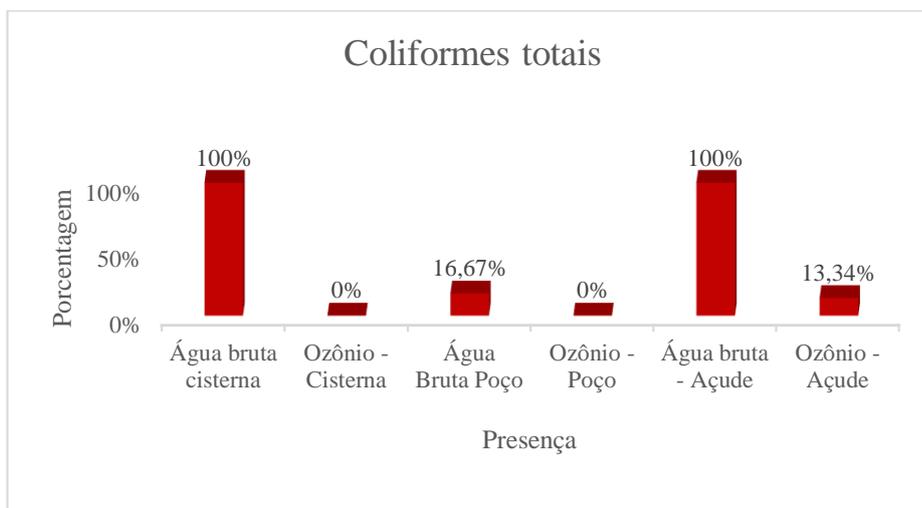
Os dados apresentados a seguir são resultados de oito meses de análises de águas advindas de três fontes: chuva (cisterna), poços e açude, que foram usadas para aferir a

eficiência do sistema de ozonização na remoção de contaminação microbiológica através da determinação da presença ou ausência de microrganismos indicadores na água (Apêndices A e B).

Os resultados obtidos a partir do monitoramento do sistema de desinfecção via ozonização são apresentados nas Figuras 24 e 25, tendo sido demonstrados os parâmetros da estatística descritiva dos conjuntos de dados amostrais, com o objetivo de verificar o atendimento aos padrões da Portaria nº 888 de 2021 do Ministério da Saúde. As análises tiveram início no mês de janeiro de 2023 e foram realizadas até o mês de agosto do mesmo ano.

Os resultados obtidos para o indicador coliformes totais, nas águas brutas oriundas de chuva (cisternas) e açudes apresentaram 100% de presença em todas as análises realizadas, podendo estar relacionados com alguns fatores, como, por exemplo, fezes de animais, reservatórios mal tampados, falta de manutenção nas partes do sistema coletor de água e mistura de águas de diversas fontes. Já as águas de poço (manual ou mecanizado) alcançam o valor de 16,67% de presença para todas as amostras, equivalentes a 5 amostras contaminadas. Provavelmente essa contaminação deu-se pelo método de retirada de água do poço, o qual era manual e ficava exposto a intempéries.

Figura 24 – Resultados das análises de coliformes totais



Fonte: O autor (2024).

Após a realização do processo de desinfecção com ozonização pode-se perceber que 100% dos resultados obtidos para as cisternas e poços analisados foram negativos para presença de coliformes totais. Apenas na água bruta advinda de açude houve uma presença em 13,34% desses microrganismos nas amostras coletadas, muito provavelmente pela alta turbidez dessas

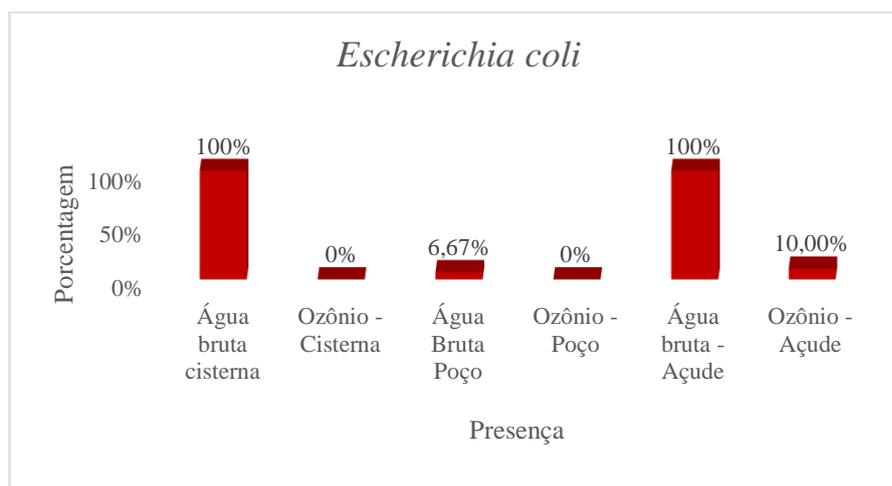
amostras que dificultaram o processo de desinfecção. A Portaria nº 888 de 2022 preconiza que, para soluções alternativas de abastecimento, as amostras sejam negativas para coliformes totais em todas as coletas.

Dentre os principais indicadores de contaminação microbiana, a análise de coliformes totais torna-se importante para a investigação da qualidade das águas, pois bactérias do grupo coliforme podem estar presentes no intestino humano e de animais de sangue quente, sendo eliminadas nas fezes em números elevados. Entretanto, o grupo dos coliformes inclui bactérias não exclusivamente de origem fecal, podendo ocorrer naturalmente no solo, na água e em plantas. Além disso, principalmente em climas tropicais, os coliformes apresentam capacidade de se multiplicar na água (BRASIL, 2016), o que pode ser o caso encontrado nos resultados desta pesquisa

A origem fecal da *Escherichia coli* é inquestionável e sua distribuição ubíqua pouco provável, o que valida seu papel de organismo indicador de contaminação fecal tanto em águas naturais quanto tratadas (BRASIL, 2021b).

A análise dos resultados mostrou que a água de cisterna e açude analisada teve, em 100% dos casos, resultado positivo para presença de *Escherichia coli*, já a água de poço teve 6,67% de presença, em contrapartida, as análises após o tratamento com a utilização de desinfecção por ozônio mostraram que, em 100% dos casos, o resultado foi negativo para a presença do indicador em águas de cisternas e poços (Figura 25), somente a água de açude teve 10% das amostras positivas nesse teste, ou seja, três das trinta amostras analisadas. Sendo assim, pode-se associar a ausência de contaminação microbiana à utilização do processo de desinfecção por ozonização.

Figura 25 – Resultados das análises de *Escherichia coli*



Fonte: O autor (2024).

Ao final pode-se inferir que o processo de desinfecção por meio de ozonização na água, foi fator preponderante da remoção de microrganismos na água em especial, nas fontes oriundas de cisternas e poços, entretanto esse resultando não se confirmou nas águas de açudes, podendo ser justificado por serem águas brutas com uma alta concentração de sólidos em suspensão. Sendo assim, a técnica de ozonização da água pode ser uma alternativa interessante para garantir a segurança sanitária de águas com baixa concentração de sólidos em suspensão em regiões dispersas, tendo vários benefícios como a geração no local, praticidade e não deixar sabor residual, se comparado com os outros desinfectantes regularmente utilizados.

5.4 Plano de Segurança da Água rural

O PSA deve ser estruturado de uma forma simples e objetiva, de modo a facilitar o entendimento dos aspectos essenciais relacionados com a gestão de pontos de controle e definição dos pontos críticos do sistema. Pontos de controle foram estabelecidos para cada uma das três etapas do sistema (tratamento, distribuição e reservação), escolha que levou em consideração os resultados da análise de risco em soluções alternativas de abastecimento.

A partir dos resultados avaliados na análise de risco foi possível elaborar um protocolo de medidas de controle mais importantes para as etapas das soluções alternativas de abastecimento, voltado para as boas práticas e o princípio das múltiplas barreiras. Este protocolo, destinado tanto para as comunidades que utilizam esses sistemas quanto para as autoridades responsáveis pela gestão e supervisão, visa fornecer orientações práticas para melhorar a qualidade da água (Tabela 17).

Tabela 17 – Protocolo de ações e recomendações práticas para soluções alternativas

Etapa	Ação Recomendada	Responsável	Periodicidade	Descrição
Captação da Água	Proteção da fonte: proteger a área de captação contra contaminação	Comunidade/ Autoridades: Companhia de água e vigilância municipal	Contínua	Implementar cercas e barreiras naturais para proteger fontes de água de contaminação animal e humana; regular atividades agrícolas e industriais nas proximidades das fontes.

Tratamento da água	Manutenção regular dos equipamentos de captação	Comunidade	Mensal	Inspeccionar e limpar regularmente bombas mecânicas ou manuais, poços e canais de captação, telhados, calhas e tubulações; substituir componentes desgastados para garantir a eficiência da captação.
	Pré-tratamento: grades, telas e filtros	Comunidade	Semanal	Implementar grades e telas para retirada de sólidos maiores e evitar entrada de vetores no sistema; utilizar filtros de areia e cascalho para remover partículas.
	Desinfecção: cloro, ozônio ou outros oxidantes.	Comunidade/ Autoridades: Companhia de água e vigilância municipal	Diária	Adicionar o desinfectante na dosagem correta para inativação dos microrganismos; monitorar níveis de eficiência do processo.
	Filtração implementar sistemas de tratamento adequados (filtros, cloração)	Comunidade/ Autoridades: Companhia de água e vigilância municipal	Diária	Usar filtros de carvão ativado ou cerâmica para remover contaminantes menores e melhorar o sabor e odor da água (filtro de barro); manter e limpar os filtros regularmente.
		Comunidade	Trimestral	Limpar tanques, caixas de águas, baldes e bombonas de armazenamento para evitar a proliferação de algas e bactérias; verificar a

Armazenamento	Limpeza e manutenção de reservatórios			integridade estrutural dos reservatórios para prevenir contaminações externas; manter sempre tampados para evitar a entrada de vetores.
Distribuição	Inspeção de redes de distribuição/caminhões-pipas/tubulações, canais e calhas	Comunidade/ Autoridades: Companhia de água, vigilância municipal e exército	Mensal	Verificar regularmente a rede de distribuição, tubulações, canais e calhas para identificar e reparar vazamentos; garantir que os veículos transportadores sejam inspecionados regularmente.
Monitoramento da qualidade	Testes de Qualidade da Água	Autoridades: vigilância municipal	Semanal	Realizar testes microbiológicos e químicos para verificar a potabilidade da água; documentar e comunicar os resultados dos testes para a comunidade e autoridades.
Educação e conscientização	Programas de Educação Comunitária	Comunidade/ Autoridades: vigilância municipal	Semestral	Organizar mídias digitais e sessões educativas sobre práticas de higiene e conservação da água; distribuir materiais informativos sobre a importância da qualidade da água e como mantê-la.
Gestão e Governança	Criação de Comitês de		Contínua	Estabelecer comitês comunitários para supervisionar e gerir as ações de segurança da água;

	Gestão de Água	Autoridades: Vigilância municipal		facilitar a comunicação entre a comunidade e as autoridades para resolução de problemas e implementação de melhorias.
Planos de Contingência	Desenvolvimento de Planos de Emergência	Comunidade/ Autoridades: Companhia de água, vigilância municipal	Anual	Elaborar planos de ação para responder a emergências como contaminação acidental ou falhas no sistema; treinar a comunidade sobre as ações a serem tomadas em caso de emergência.

Fonte: O autor (2024).

Para a implementação do PSA em soluções alternativas de abastecimento, deve-se levar em conta a simplificação de protocolos e procedimentos, para que se possa obter êxito na aplicação em zonas rurais, mas sem abrir mão da qualidade do resultado final.

As companhias de águas e a vigilância municipal são responsáveis e devem promover ações educativas nessas comunidades com o objetivo de conscientizar a população sobre seu papel para garantir a qualidade da água consumida, devendo ser capacitados para que fiquem cientes das medidas que podem ser tomadas para garantir a segurança da água. Para tanto, são necessárias reuniões periódicas com as comunidades das áreas atendidas, conforme descrito na Tabela 17.

É fundamental que o responsável pela gestão da solução alternativa preste todo o apoio técnico e financeiro para a realização dessas atividades, visto que há uma responsabilidade legal de controle e vigilância da qualidade das águas em suas diversas fontes de abastecimento. Algumas ações foram propostas por este estudo, como medidas auxiliares para implementação do princípio de múltiplas barreiras nas soluções alternativas de abastecimento, como o checklist simplificado, o qual a própria comunidade pode avaliar alguns indicadores de risco para a contaminação da água (Tabela 18).

Tabela 18 – Checklist de procedimentos de segurança sanitária para soluções alternativas de abastecimento

Etapas	Procedimento	Conforme	Não conforme	Não se aplica
Captação	Manutenção dos dispositivos de retiradas da água estão em dia (bombas manuais e mecânicas)			
	Fazer a limpeza periódica, trimestralmente, dos dispositivos de coleta de água			
	A retirada da água deve ser feita exclusivamente por bomba hidráulica ou manual			
	Sem disposição de resíduos sólidos próximo a captação			
	Sem presença de animais e/ou fezes próximo a fonte			
	Distante de fossas e sumidouro ou lançamentos de efluentes			
Distribuição	As tubulações, canais ou mangueiras utilizadas na captação ou abastecimento estão em condições de uso			
	Os veículos transportadores estão com a inspeção em dia e cadastrados			
Tratamento	Etapas preliminares estão em funcionalidade grades e telas			
	O sistema de tratamento está em funcionamento			
	O método de desinfecção para a manutenção da qualidade microbiológica da água está em funcionamento			
Armazenamento	Fazer a limpeza periódica, a cada seis meses, do reservatório e dos dispositivos de retirada da água			
	Utilização de recipiente exclusivo para a retirada e armazenamento de água potável			
	Utilização de tampas vedantes nos reservatórios			
	Sem a presença de animais e/ou fezes próximo ao reservatório			
	Quantidade de biofilme aparente			

Fonte: O autor (2024).

Recomenda-se que os órgãos responsáveis pelo abastecimento levem em consideração os principais riscos analisados neste estudo, sendo imprescindível a utilização de água tratada para o abastecimento nas soluções alternativas. A companhia de águas e a vigilância sanitária municipal devem implementar procedimentos de segurança para a otimização do processo de tratamento das águas, dentro das suas especificidades.

Os protocolos de revisão e avaliação devem seguir as recomendações da legislação vigente de informação ao consumidor. O plano de segurança da água é um documento dinâmico, por isso mesmo deve ser atualizado periodicamente, passando por auditorias internas e externas, para que, assim, assegure a sua eficácia.

Portanto, em soluções alternativas comunitárias, é imprescindível que os usuários sejam treinados para conduzir auditorias no sistema de abastecimento de água. Esse treinamento deve abranger tanto a produção da documentação pertinente quanto os procedimentos de comunicação necessários. Através dessas auditorias, as autoridades competentes poderão implementar as medidas corretivas necessárias. Adicionalmente, uma auditoria deve ser realizada a cada seis meses pela equipe gestora do sistema, com o objetivo de verificar as condições locais (Tabela 19).

Tabela 19 – Quadro das ações sintetizadas do processo de condução da auditoria PSA

1. Início da auditoria
<ul style="list-style-type: none"> a) Identificar o líder da equipe na comunidade; b) Definir os objetivos, escopo e critérios da auditoria; c) Determinar a viabilidade da auditoria; d) Selecionar a equipe de auditoria; e) Estabelecer o contato inicial com a área auditada.
2. Realizando análise crítica de documentos
<p>Analisar criticamente documentos pertinentes ao sistema de gestão, incluindo registros, e determinar a sua adequação com respeito ao critério da auditoria</p>
3. Preparando a atividade de auditoria
<ul style="list-style-type: none"> a) Preparar o plano de auditoria; b) Designar trabalho para a equipe de auditoria; c) Preparar documento de trabalho.
4. Conduzindo atividades de auditoria
<ul style="list-style-type: none"> a) Conduzir a reunião de abertura; b) Comunicação durante a auditoria; c) Funções e responsabilidades de guias e observadores; d) Coleta e verificação de informações; e) Gerar constatações de auditorias; f) Preparar conclusões da auditoria; g) Conduzir reunião de encerramento.

Continua

Continuação

5. Preparação, aprovação e distribuição do relatório de auditoria

- a) Preparar o relatório de auditoria;
 - b) Aprovando e distribuindo o relatório.
-

6. Concluir a auditoria

Fonte: Adaptado de Borges (2023).

6 DISCUSSÃO

A adaptação do Plano de Segurança da Água (PSA) viabiliza a sua implementação em comunidades dispersas, dado que o PSA ordinário é instrumento demasiadamente complexo para essas localidades (Li *et al.*, 2020; Murei *et al.*, 2022). Estudos recentes destacaram a importância da adequação do PSA para diferentes contextos regionais e a eficácia de métodos de análise de risco como proposto por Fagundes (2022), Lane *et al.*, (2022) e Mpindou; Bueno; Ramón (2022). A utilização dos métodos de análise de risco HAZOP e FMEA, revelou-se fundamental para a priorização dos riscos mais prevalentes nessas regiões, com o objetivo de garantir a segurança e a qualidade da água nessas comunidades.

O uso do HAZOP revelou-se uma importante ferramenta para identificação dos pontos críticos nos processos de captação, tratamento, distribuição e reservação das diferentes fontes de abastecimento das soluções alternativas em regiões dispersas (O Herrera *et al.*, 2018). A análise permitiu identificar os principais desvios operacionais, como acúmulo de sedimentos, falhas de manutenção, e interrupções no fornecimento de água, os quais comprometem a segurança sanitária da água.

A poluição por sedimentos, observada nas captações de água de chuva e poços, é um problema recorrente em sistemas que carecem de manutenção regular. Conforme identificado após a análise de risco HAZOP nesse estudo, a falta de limpeza nas calhas, canais e tubulações facilita o acúmulo de sedimentos, aumentando a turbidez da água e elevando o risco de contaminação microbiana. Estudos como o de Filho (2014) e Marengo (2008), identificaram que a ausência de manutenção em sistemas de captação em áreas rurais pode levar a problemas semelhantes, onde a turbidez elevada resulta em uma maior carga microbiana e compromete a eficácia dos processos de desinfecção.

As falhas na manutenção dos sistemas de captação e armazenamento, como cisternas e caixas d'água, foram apontadas como uma das principais causas do comprometimento da qualidade da água. A falta de um cronograma rigoroso de inspeção e manutenção preventiva

foi associada a um aumento na contaminação e na necessidade de dosagens maiores de desinfetantes, o que, por sua vez, eleva a possibilidade de geração de subprodutos potencialmente prejudiciais à saúde humana. O trabalho de Toan *et al.* (2022) corrobora esses achados, destacando a importância de uma manutenção regular para prevenir a degradação dos sistemas e evitar a exposição da população a riscos sanitários.

A interrupção do fornecimento de água, devido à intermitência ou ausência do sistema convencional de abastecimento, representa um risco significativo para as comunidades dependentes dessas soluções. Em tais situações, as comunidades são forçadas a recorrer a fontes alternativas de qualidade incerta, o que pode agravar os riscos sanitários. Este cenário é comum em áreas dispersas, como evidenciado por estudos de Machado *et al.* (2023) e Silva (2024), que ressaltam a vulnerabilidade dessas populações diante de falhas mecânicas e a necessidade de planos de contingência robustos para essas localidades.

Já para a análise do produto água nas SACs, a utilização do FMEA foi crucial para hierarquizar os perigos associados à qualidade da água nas soluções alternativas de abastecimento. A análise identificou a presença de coliformes totais e *Escherichia coli* como os principais riscos, seguidos por parâmetros como alta turbidez e baixa concentração de cloro residual livre.

A detecção de coliformes totais e *E. coli* nas amostras de água bruta evidencia a inadequação dos métodos de captação, transporte e armazenamento de água em comunidades dispersas. A severidade desses indicadores foi classificada como muito alta, refletindo a gravidade do risco para a saúde pública. Nasim; El-zein; Thomas (2022) encontraram resultados semelhantes em comunidades rurais na Ásia, onde a contaminação fecal nas fontes de água foi associada a surtos de doenças gastrointestinais. A manutenção inadequada dos reservatórios, tubulações de transporte e o uso indevido de recipientes para coleta de água foram identificados como causas primárias desses problemas, reafirmando a necessidade de intervenções estruturais e educacionais nessas localidades.

A baixa concentração de CRL é outro fator de risco identificado, indicando a falta de barreiras de proteção contra novas contaminações. O estudo destacou que a deficiência no sistema de cloração, associada à falta de manutenção, compromete a eficácia do tratamento da água. Trabalhos de pesquisadores como Kristanti *et al.* (2022) mostraram que a baixa concentração de desinfetante é comum em áreas onde o controle operacional é limitado, resultando em uma proteção insuficiente contra patógenos.

A alta turbidez, observada principalmente nas águas de açudes, foi identificada como um desafio significativo para o processo de desinfecção. A presença de sólidos suspensos

interfere na eficácia dos desinfetantes, como o cloro e o ozônio, tornando o controle microbiológico mais difícil. Liang *et al.* (2022) apontam que a turbidez elevada está frequentemente associada a uma menor eficiência de desinfecção e à necessidade de tratamentos complementares para garantir a potabilidade da água.

Uma alternativa é o desenvolvimento e implementação de um sistema de desinfecção para essas localidades. Sendo assim, a ozonização aparece como uma alternativa para a substituição do cloro. As avaliações experimentais desse estudo demonstraram eficácia do Ozônio na inativação de coliformes totais e *E. coli* em amostras de água de cisternas e poços, como também demonstraram menor eficiência em águas de açudes devido à alta turbidez. Essas localidades enfrentam dificuldades na utilização do cloro devido à ausência de sistemas convencionais operacionais e à distância dos grandes centros urbanos. Nesse contexto, o ozônio se apresenta como uma alternativa viável, sendo um oxidante potente que pode ser gerado diretamente no local. Estudos como o de Hasballah; El-Gohary; El-Battrawy (2023) corroboram essa ideia, destacando que o ozônio é particularmente eficaz na inativação de patógenos.

No entanto, o sistema de ozonização foi menos eficaz para as águas de açudes, onde a alta turbidez resultou na persistência de coliformes. Esta limitação é consistente com a literatura, como discutido por Zanacic; Stavrinides; Mcmartin (2016), que mostraram que a presença de matéria particulada em suspensão pode diminuir significativamente a eficácia do ozônio, exigindo pré-tratamentos para remoção de sólidos antes da desinfecção.

Com base nos resultados das análises de risco, foram desenvolvidos protocolos de ações e recomendações práticas voltadas para a melhoria da qualidade da água nas soluções alternativas de abastecimento. Ou seja, diretrizes que podem ser utilizadas nessas localidades com o objeto de garantir maior segurança sanitária no consumo da água.

O protocolo enfatiza a importância de um cronograma regular de inspeção e manutenção de todos os componentes dos sistemas de captação, tratamento e distribuição. Este enfoque é consistente com as melhores práticas internacionais, como sugerido por WHO (2022), que recomendam a adoção de rotinas de manutenção preventiva para reduzir a ocorrência de falhas e melhorar a resiliência dos sistemas de abastecimento.

Outro fator importante é a educação da comunidade sobre o uso adequado e a manutenção das infraestruturas de água é uma recomendação chave para mitigar riscos. Estudos como o de Corrêa; Ventura (2020) e Ferrero *et al.* (2019) destacam que a participação ativa da comunidade na gestão da água é essencial para o sucesso dos PSAs, especialmente em áreas onde os recursos técnicos e financeiros são limitados.

Por fim, a elaboração de planos de contingência e a realização de auditorias regulares pelos gestores das SACs foram identificadas como práticas essenciais para garantir a continuidade da segurança da água. A necessidade de auditorias internas e externas para monitorar a eficácia do PSA está em linha com as diretrizes estabelecidas pela NBR 17.080/2023, que recomenda auditorias periódicas para manter a conformidade com os padrões de segurança e qualidade (Brasil, 2023).

7 CONCLUSÕES

O plano de segurança da água foi desenvolvido de forma simplificada selecionando as etapas preponderantes para as soluções alternativas de abastecimento, dessa forma foi realizada a caracterização das cinco fontes possíveis de água nas zonas rurais visando encontrar os principais perigos presentes de não conformidade de água nessas localidades. Ao final do estudo se chegou a esses desvios utilizando o método HAZOP, sendo os mais recorrentes:

- Para captação de água de chuva: contaminação e acúmulo de sedimentos, aumento do risco sanitário e interrupção do abastecimento;
- Para captação de água subterrânea: falhas no abastecimento e qualidade da água, risco sanitário aumentado, problemas de potabilidade e contaminação microbiana e desafios no manuseio e armazenamento da água;
- Para a rede convencional: intermitência e falha no abastecimento, riscos sanitários aumentados, contaminação de reservatórios e problemas no manuseio e armazenamento de água;
- Para captação direta de manancial: deterioração da qualidade da água, falhas no transporte da água bruta, riscos sanitários aumentados por falhas de tratamento, contaminação em reservatórios e riscos associados e problemas no armazenamento e retirada da água;
- Para veículos transportadores: contaminação da água durante o abastecimento, riscos de contaminação durante o transporte e falhas no abastecimento dos reservatórios.

Com a utilização da análise de risco tipo FMEA, conseguiu-se identificar e ponderar os perigos mais prevalentes, são eles: presença de *Escherichia coli*, presença de coliformes totais, baixa e alta concentração de CRL, e alta turbidez, como também sugerir medidas de controle,

identificando os maiores riscos para o produto água. Assim, são os parâmetros que se deve uma atenção para essas soluções de abastecimento.

Também, conseguiu-se propor, a partir das análises realizadas, um protocolo de ações e recomendações práticas para soluções alternativas, checklist de procedimentos de segurança sanitária para soluções alternativas de abastecimento e as ações do processo de condução da auditoria PSA. Os quais são sugestões de como se deve proceder na operação dessas fontes de abastecimento.

Por fim, o estudo conseguiu avaliar experimentalmente a eficiência do processo de ozonização em diferentes fontes de abastecimento, tendo um resultado satisfatório para águas advindas de cisternas e poços, com inativação total dos indicadores de contaminação microbiológicas utilizados: coliformes total e *Escherichia coli*. Já nas águas brutas de açudes para esses mesmos indicadores, obtiveram a presença de 13,34% e 10,00%, respectivamente, mesmo após o processo de ozonização, provavelmente pelo fato do alto teor de turbidez (sólidos em suspensão) presente na água, o que acaba por dificultar a inativação de alguns microrganismos.

Sugere-se para futuras pesquisas, aprofundar a utilização de ozonização em diferentes concentrações para essa finalidade, como também a avaliação dos subprodutos gerados após o processo de desinfecção com essa técnica.

REFERÊNCIAS

- AALI, R.; FAHIMINIA, M.; MAHDI ASADI-GHALHARI, M.; FANAELI, F.; MOSTAFALOO, R.; KISHIPOUR, A. Accomplishment of water safety plan using quality assurance tool in 2020 – 2021: A case study in a western city of Gilan province, Iran. **Environmental Health Engineering and Management Journal**, v. 8, n. 4, p. 287 – 294, 2021.
- ABRAMOVAY, R. **O futuro das regiões rurais**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009.
- ADDO-BEDIAKO, A. MARR, SM.; JOOSTE, A.; LUUS-POWELL, WJ. Human health risk assessment for silver catfish *Schilbe intermedius Rüppell*, 1832, from two impoundments in the Olifants River, Limpopo, South Africa. **Water SA**, v. 40, n. 4, p. 607-614, 2014.
- AKKOYUNLU, A.; AKINER, M. E. Pollution evaluation in streams using water quality indices: a case study from Turkey's Sapanca Lake Basin. **Ecological Indicator**, n. 18, p. 501–511, 2012.
- ALBANO, G.; MALHEIROS, T. F. Mapeamento dos serviços de água e esgoto não convencionais no Estado do Ceará. In: **Livro de resumos expandidos**. São Carlos, SP: EESC/USP, 2021.
- ALEXANDRATOS, S. D.; ALEXANDRATOS, S. D.; BARAK, N.; BAUER, D.; DAVIDSON, F. T.; GIBNEY, B. R.; HUBBARD, S. S.; TAFT, H. L.; WESTERHOF, P. Sustaining water resources: Environmental and economic impact. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 3, p. 2879-2888, 2019.
- ANGOUA, E. L. E.; DONGO, K.; TEMPLETON, M. R.; ZINSSTAG, J.; BONFOH, B. Barriers to access improved water and sanitation in poor peri-urban settlements of Abidjan, Côte d'Ivoire. **PloS One**, v. 13, n. 8, 2018.
- ARAÚJO, M.; OLIVEIRA, R. A hybrid approach associating flow network modeling with AHP-Entropy for simulating and ranking water-demand management alternatives. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, n. 2, 2021.
- AYED, L. B. Assessment of the parasitological quality of water stored in private cisterns in rural areas of Tunisia. **Journal of Water Health**, v.16. n. 5. p.737–749, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA. **Ranking Abes da universalização do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17080**: Plano de segurança da água – Princípios e diretrizes para elaboração e implementação. Brasília: ABNT, 2023.
- ATABATI, H.; KASSIRI, H.; SHAMLOO, E.; AKBARI, M.; ATAMALEKI, A.; SAHLABADI, F.; LINH, N. T. T.; ROSTAMI, A.; FAKHRI, Y.; KHANEGHAH, A. M. The association between the lack of safe drinking water and sanitation facilities with intestinal *Entamoeba spp* infection risk: A systematic review and meta-analysis. **PloS One**, v. 15, n. 11, 2020.

AUGUSTO, L. G. S.; GURGEL, I. G. D.; NETO, H. F., C.; MELO, C. H.; COSTA, A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1511 – 1522, 2012.

AWORTWI, N. The riddle of community development: factors influencing participation and management in twenty-nine African and Latin American communities. **Community Development Journal**. v. 48, n. 1, p. 89-104, 2013.

BAKSHSHIANLAMOUKI, E.; MASIA, S.; KARIMI, P.; ZAAG, P. V. D.; SUŠNIK, J. A system dynamics model to quantify the impacts of restoration measures on the water-energy-food nexus in the Urmia Lake Basin, Iran. **Science of The Total Environment**, v. 708, 2020.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; MIERZWA, J. C. Análise de risco aplicada ao abastecimento de água para consumo humano. *In*: PÁDUA, V. L. **Remoção de microrganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, Cap. 9, p. 328-362, 2009

BAUM, R.; BARTRAM, J. A systematic literature review of the enabling environment elements to improve implementation of water safety plans in high-income countries. **Journal of Water and Health**, v. 16, n. 1, p. 14-24, 2018.

BITTENCOURT, V.; PEREIRA, D. E. S. A evolução legislativa brasileira frente à problemática da água. **Revista Justiça do Direito**, v. 27, n. 1, p. 189-205, 2013.

BLOCHA, C.; BUGGED, M. Public sector innovation: From theory to measurement. **Structural Change and Economic Dynamics**, v.27, p. 133–145, 2013.

BOGLER, A. *et al.* Rethinking wastewater risks and monitoring in light of the COVID-19 pandemic. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 12, p. 981-990, 2020.

BORETTI, A.; ROSA, L. Reassessing the projections of the world water development report. **NPJ Clean Water**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2019.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; YANG, J. E.; ALEWELL, C.; WUEPPER, D.; MONTANARELLA, L.; BALLABIO, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **PNAS**, v. 117, n. 36, p. 21994-22001, 2020.

BOS, R.; ALVES, D.; LATORRE, C.; MACLEOD, N.; PAYEN, G.; ROAF, V.; ROUSE, M. **Manual sobre os direitos humanos à água potável e saneamento para profissionais**. London: IWA Publishing, 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano (VIGIÁGUA)**. Brasília, DF: Secretaria de Vigilância em Saúde, 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Plano de Segurança da Água: Garantindo a qualidade e promovendo a saúde - Um olhar do SUS**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (SISAGUA)**. Brasília, DF: Ministério da saúde, 2016.

BRASIL. **Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017**. Dispõe sobre a consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2017a.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Panorama do Saneamento rural no Brasil**. Brasília, DF: Funasa, 2017b.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Programa nacional de saneamento rural**. Brasília, DF: Funasa, 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**. Brasília, DF: MDR, 2021a.

BRASIL. Ministério da saúde. **Portaria de nº 888, de 04 de maio de 2021**. Dispõe sobre procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2021b.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021**. Brasília, DF: MDR/SNS, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. **SISAGUA**. Secretaria de Vigilância em Saúde. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. **DATASUS: Informações de Saúde. Tabnet**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024. Disponível em: <https://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude-tabnet/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BRINKS, D. M.; SINGH, A.; WILSON, B.M. The Decentered Construction of Global Rights: Lessons from the Human Rights to Water and Sanitation. **Water**, v. 14, n. 11, p. 1795, 2022.

BROWN, R. M.; MCCLELLAND, N. I.; DEININGER, R. A.; TOZER, R. G. A water quality index - do we dare? **Water Sewage Works**, v. 117, n. 10, p. 339-343, 1970.

BUDELI, P.; MOROPENG, R. C.; MOMBA, M. N. B. Improvement of biosand filtration systems using silver-impregnated clay granules. **Journal of Water Process Engineering**, v. 41, p. 102049, 2021.

BUSCH, O. M. S. **Qualidade da água e saúde humana: riscos potenciais face ao processo de ocupação urbana no entorno da Represa do Passaúna - Curitiba – PR**. 2009. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

CAI, W-J.; FEELY, R. A.; TESTA, J. M.; LI, M.; EVANS, W.; ALIN, S. R.; XU, Y-Y.; PELLETIER, G.; AHMED, A.; GREELEY, D. J.; NEWTON, J. A.; BEDNARŠEK, N. Natural and anthropogenic drivers of acidification in large estuaries. **Annual Review of Marine Science**, v. 13, n. 1, 2021.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologias e gestão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CAMACHO, N. C. C. Tratamiento de agua para consumo humano. **Ingeniería Industrial**, v.29, n. 029, p. 153-170, 2011.

CAMEL, V.; BERMOND, A. The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment. **Water research**, v. 32, n. 11, p. 3208-3222, 1998.

CARRARD, N.; KOHLITZ, J.; SOETERS, S.; HALCROW, G.; MURTA, J.; WILLETTS, J. Reaching all in rural sanitation: Experiences from inclusive programming in five countries. **Development in Practice**, v. 30, n. 5, p. 609-623, 2020.

CARVALHO, T. C. A. **Análise de desempenho da infraestrutura de salas limpas na produção de vacina febre amarela (atenuada)**. 2023. Dissertação (Pós-graduação em vigilância sanitária) – Instituto Nacional de Controle de Qualidade em saúde, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2023.

CHEN, L.; LI, J.; FU, W.; ZHANG, X. Ceramic membrane based hybrid process for the upgrade of rural water treatment plants: A pilot study. **Water Environment Research**, v. 93, n. 1, p. 75-83, 2021.

CHOWDHARY, P.; BHARAGAVA, R. M.; MISHRA, S.; KHAN, N. Role of industries in water scarcity and its adverse effects on environment and human health. *In: Environmental concerns and sustainable development*. Singapura: Springer, p. 235-256, 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo 2018**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios>. Acesso em: 30 jul. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução 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, e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 396, de 07 de abril de 2008**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2008.

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, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

CORDNER, A; DE LA ROSA, V. Y.; SCHAIDER, L. A.; RUDEL, R. A.; RICHTER, L.; BROWN, P. Guideline levels for PFOA and PFOS in drinking water: the role of scientific uncertainty, risk assessment decisions, and social factors. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 29, p. 157-171, 2019.

CORRÊA, R. F. M.; VENTURA, K. S. Instrumento para implementação do Plano de Segurança da Água em comunidades rurais: validação em um acampamento de agricultores

no município de São Carlos, SP. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 54, p. 65-79, 2020.

CORRÊA, R. F. M.; VENTURA, K. S. Plano de Segurança da Água: modelo conceitual para monitoramento de riscos à contaminação de água em comunidades rurais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, 2021.

COSTA FILHO, F. das C. da. **Metodologia de apoio à gestão de qualidade de águas pluviais da macrodrenagem urbana em áreas de arranjos populacionais médios**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2020.

COSTA, L. A. A.; PESSOA, D. M. M.; CARREIRA, R. S. Indicadores químicos e biológicos da entrada de um rio de esgoto em um estuário tropical urbano (Baía de Guanabara, Brasil). **Indicadores Ecológicos**, v. 90, p. 513-518, 2018.

CRAWLEY, F.; TYLER, B. **HAZOP: Guide to Best Practice**. Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2015.

CUDE, C. Oregon water quality index: A tool for evaluating water quality management effectiveness. **Journal of the American Water Resources Association**, n. 37, p. 125-137, 2001.

DANIEL, A. L.; LEITE, L. S. Ozonização. In: MANCUSO, P. C. S. *et al.* **Reuso de água potável como estratégia para a escassez**. 1. ed. São Paulo: Manole, p. 244-261, 2021.

DANIEL, M. H. B.; CABRAL, A. R. A Vigilância da qualidade da água para consumo humano (VIGIAGUA) e os Objetivos do Desenvolvimento do Milênio (ODM). **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 19, n. 4, p. 487-492, 2011.

DARONCO, G. C. Evolução histórica da legislação brasileira no tratamento dos recursos hídricos: das primeiras legislações até a Constituição Federal de 1988. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013, Bento Gonçalves. Anais XX Simpósio brasileiro de recursos hídricos. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1 – 7.

DEWI, T; FITRIA, S.; RISMA, P.; OKTARINA, Y. Modeling of ozone reactor for water treatment. **Advances and Technology Development in Greenhouse Gases: Emission, Capture and Conversion**, p. 273-292, 2024.

DINKA, M. O. Safe drinking water: concepts, benefits, principles and standards. **Water Challenges ff an Urbanizing World, Intechopen, London**, p. 163-181, 2018.

DIRVEN, M.; PERICO, R.E.; SABALAIN, C.; RODRÍGUEZ, A.; BAEZA, D.C.; PEÑA, C.; FAIGUENBAUM, S. **Hacia una nueva definición de “rural” con fines estadísticos en América Latina**. Santiago do Chile: CEPAL, 2011.

D'ODORICO, P.; DAVIS, K. F.; ROSA, L.; CARR, J. A.; CHIARELLI, D.; DELL'ANGELO, J.; GEPHART, J.; MACDONALD, G. K.; SEEKELL, D. A.; SUWEIS, S.; RULLI, M. C. The global food-energy-water nexus. **Reviews of Geophysics**, v. 56, n. 3, p. 456-531, 2018.

DURESSA, G.; ASSEFA, F.; JIDA, M. Assessment of bacteriological and physicochemical quality of drinking water from source to household tap connection in Nekemte, Oromia, Ethiopia. **Journal of Environmental and Public Health**, v. 2019, 2019.

EKUNDAYO, T. C.; IGWARAN, A.; OLUWAFEMI, Y. D.; OKOH, A. I. Global bibliometric meta-analytic assessment of research trends on microbial chlorine resistance in drinking water/water treatment systems. **Journal of Environmental Management**, v. 278, 2021.

ELSAMADONY, M.; FUJII, M.; MIURA, T.; WATANABE, T. Possible transmission of viruses from contaminated human feces and sewage: Implications for SARS-CoV-2. **Science of the Total Environment**, v. 755, 2021.

ERNAZAROVICH, M. I.; KUVATOVICH, A. K.; ERNAZAROVNA, M. D.; MAMARAJBOVICH, M. S.; MUHTARALIEVNA, R. M.; BERDIYOR, N. D.; IXTIYOR, B. B. Development Of A High-Performance Technology For Mixing Ozone With Water For The Preparation Of Drinking Water From The Reservoir. **Journal of Positive School Psychology**, p. 2921-2925, 2022.

FAGUNDES, I. C. **Identificação de perigos potenciais em soluções alternativas coletivas rurais de abastecimento de água para elaboração de planos de segurança da água**. 2022. Dissertação (Pós-graduação de recursos hídricos e saneamento ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

FAUST, S. D.; ALY, O. M. **Chemistry of water treatment**. 1. ed. Flórida: CRC Press, 2018.

FERNANDES, A. C. G.; BORGES, I. M. S.; SILVA, V. F.; GOMES, R. M. A Democratização do acesso à água em regiões semiáridas e a importância da lei 12.873/2013. **Research, Society and Development**, v. 10, n.11, 2021.

FERREIRA, W. B. **Solução alternativa de abastecimento de água para consumo humano em comunidades difusas: Monitoramento e controle de qualidade da água**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2008.

FERREIRA, D. C.; GRAZIELE, I.; MARQUES, R. C.; GONÇALVES, J. Investment in drinking water and sanitation infrastructure and its impact on waterborne diseases dissemination: The Brazilian case. **Science of the Total Environment**, v. 779, 2021.

FERRERO, G.; SETTY, K.; RICKERT, B.; GEORGE, S.; RINEHOLD, A.; DEFRANCE, J.; BARTRAM, J. Capacity building and training approaches for water safety plans: a comprehensive literature review. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 222, n. 4, p. 615-627, 2019.

FILHO, A. S. M. **Patologias de sistemas de captação de água de chuva em edificações rurais do semiárido**. 2024. Tese (Pós-graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2014.

FINOTTI, A. R.; FINKLER, R.; SUSIN, N.; SCHNEIDER, V. E. Use of water quality index as a tool for urban. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 10, n. 6, p. 781-794, 2015.

FORTES, A.; BARROCAS, P. R. G.; KLIGERMAN, D. C. A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso. **Saúde em Debate**, v. 43, pp. 20-34, 2019.

GARCÍA-ÁVILA, F.; AVILÉS-AÑAZCO, A.; SÁNCHEZ-CORDERO, E.; VALDIVIEZO-GONZÁLES, L.; ORDOÑEZ, M. D. T. The challenge of improving the efficiency of drinking water treatment systems in rural areas facing changes in the raw water quality. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 37, p. 141-149, 2021.

GEE, K. de B.; SOJKA, S. Maximizing the benefits of rainwater harvesting systems: Review and analysis of selected case study examples. *In*: YOUNOS, T.; LEE, J.; PARECE, T. E. **Resilient Water Management Strategies in Urban Settings**. USA: Springer Cham, p. 77-117, 2022.

GIATTI, L. L.; CUTOLO, S. A. Acesso à água para consumo humano e aspectos de saúde pública na Amazônia Legal. **Ambiente & Sociedade**, v. 15, n. 1, p. 93 – 109, 2012, pp. 93-109.

GLÓRIA, L. P.; HORN, B. C.; HILGEMANN, M. Avaliação da qualidade da água de bacias hidrográficas através da ferramenta do índice de qualidade da água – IQA. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 14, n. 1, 2017.

GOMES, U.; HELLER, L. Acesso à água proporcionado pelo Programa de Formação e Mobilização Social para Convivência com o Semiárido: Um Milhão de Cisternas Rurais: combate à seca ou ruptura da vulnerabilidade?. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, p. 623-633, 2016.

GONÇALVES, P. M. E. **Aplicação da metodologia FMEA para avaliação do risco de incumprimento de prazo de empreitadas de construção**. 2023. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2023.

GRIMASON, A. M.; BEATTIE, T.; MORSE, T.; MASANGWI, S.; JABU, G. C.; TAULO, S.; LUNGU, K. Classification and quality of groundwater supplies in the Lower Shire Valley, Malawi - Part 1: Physico-chemical quality of borehole water supplies in Chikhwawa, Malawi. **Water SA**, v. 39, p. 573 – 582, 2013.

HAAS, C.N.; ROSE, J.B.; GERBA, C.P. **Quantitative microbial risk assessment**. 2. ed. USA: Wiley Blackwell, 2014.

HAFEEZ, A.; SHAMAIR, Z.; SHEZAD, N.; JAVED, F.; FAZAL, T.; REHMAN, S.; BAZMI, A. A.; REHMAN, F. Solar powered decentralized water systems: a cleaner solution of the industrial wastewater treatment and clean drinking water supply challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, 2021.

HASAN, H. A.; MUHAMMAD, M. H.; ISMAIL, N. I. A review of biological drinking water treatment technologies for contaminants removal from polluted water resources. **Journal of Water Process Engineering**, v. 33, 2020.

HASAN, M. K.; SHAHRIAR, A.; JIM, K. U. Water pollution in Bangladesh and its impact on public health. **Heliyon**, v. 5, n. 8, p. e02145, 2019.

HASBALLAH, A. F.; A EL-GOHARY, H.; EL-BATRAWY, O. A. Using Ozone instead of Chlorine for Drinking Water Treatment under Egyptian Conditions. **Scientific Journal for Damietta Faculty of Science**, v. 12, n. 2, p. 10-18, 2023.

HELLER, L.; PADUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

HERSCHAN, J.; RICKERT, B.; MKANDAWIRE, T.; OKURUT, K.; KING, R.; HUGHES, S. J.; LAPWORTH, D. J.; POND, K. Success Factors for Water Safety Plan Implementation in Small Drinking Water Supplies in Low- and Middle-Income Countries. **Resources**, v. 9, n. 126, 2020.

HUANG, Z.; NYA, E. L.; RAHMAN, M. A.; MWAMILA, T. B.; CAO, V.; GWENZI, W.; NOUBACTEP, C. Integrated water resource management: Rethinking the contribution of rainwater harvesting. **Sustainability**, v. 13, n. 15, p. 1 - 9, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017: Abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 10 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **PNAD Contínua – Pesquisa Nacional por amostra de domicílios contínua**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/9171-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios-continua-mensal.html>. Acesso em: 10 jan. 2024.

ISENBURG, A. A. R. V.; PINTO, D. O. Plano de Segurança da Água. Campinas: SANASA, 2024. Disponível em: <https://www.sanasa.com.br/document/noticias/3806.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

JANKOWIAK, J.; HATTENRATH-LEHMANN, T.; KRAMER, B. J.; LADDS, M.; GOBLER, C. J. Deciphering the effects of nitrogen, phosphorus, and temperature on cyanobacterial bloom intensification, diversity, and toxicity in western Lake Erie. **Limnology and Oceanography**, v. 64, n. 3, p. 1347-1370, 2019.

JOHN, A.; BROOKESB, A.; CARRA, I.; BRUCE, J.; JAVIS, P. Microbubbles and their application to ozonation in water treatment: A critical review exploring their benefit and future application. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 9, p. 1561-1603, 2022.

JUNIOR, A. P.; MENDIONDO, E. M. Redução de riscos ambientais: o necessário enfoque interdisciplinar. In: JUNIOR, A. P.; **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Barueri: Manole, p. 696 – 734, 2018.

JUNIOR, S. F. S. Plano de segurança da água (PSA) e Plano de segurança de esgotamento sanitário (PSE). In: SCALIZE, P.S; BEZERRA, N. R. **Saneamento básico rural**. Goiânia: CEGRAFE UFG, 2020.

- JUNIOR, A. L. L.; RODRIGUES, O. A. **FMEA aplicado a manutenção: revisão sistêmica e análise crítica**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2022.
- KACHROUD, M.; TROLARD, F.; KEFI, M.; JEBARI, S.; BOURRIÉ, G. Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. **Water**, v. 11, n. 2, p. 1-26, 2019.
- KAYEMBE, J. M.; THEVENON, F.; LAFFITE, A.; SIVALINGAM, P.; NGELINKOTO, P.; MULAJI, C. K.; OTAMONGA, J. P.; MUBEDI, J. I.; POTÉ, J. High levels of faecal contamination in drinking groundwater and recreational water due to poor sanitation, in the sub-rural neighborhoods of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 221, n. 3, p. 400-408, 2018.
- KLAMT, R.; COSTA, A. B.; GAEDKE, M. A.; LOBO, E. A. Drinking water quality indices: a systemic review. **Revista Ambiente e Água – An interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 16, n. 2, 2021.
- KLEEMEIER, E. The impact of participation on sustainability: An analysis of the Malawi rural piped scheme program. **World Development**. v. 28, n. 5, p. 929 - 944, 2000.
- KOHLITZ, J.; CARRARD, N.; WILLETTS, J. Support mechanisms to strengthen equality and non-discrimination (EQND) in rural sanitation (Part 2 to 2). *In: Frontiers of CLTS: Innovations and Insights*. Brighton: IDS, 2019.
- KOUTSOYIANNIS, D. Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying?. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 8, p. 3899-3932, 2020.
- KRISTANTI, R. A.; HADIBARATA, T.; SYAFRUDIN, M.; YILMAZ, M.; ABDULLAH, S. Microbiological contaminants in drinking water: Current status and challenges. **Water, Air and Soil**, v. 233, n. 299, 2022.
- LANE, K.; FULLER, M.; DYMENT, T.; GAGNON, G. Co-development of a risk assessment tool for use in the First Nations water supply systems: A key step to water safety plan implementation. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 240, p. 113916, 2022.
- LARSEN, M. A. D.; PETROVIC, S. ; ENGSTRÖM, R. E.; DREWS, M.; LIERSCH, S.; KARLSSON, K. B.; HOWELLS, M. Challenges of data availability: Analysing the water-energy nexus in electricity generation. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, 2019.
- LEE, R.; LEE, J.-H.; GARRETT, T. C. Synergy effects of innovation on firm performance. **Journal of Business Research**, v. 99, p. 507-515, 2019.
- LEONARD, D.; GATO-TRINIDAD, S. Effect of Rainwater Harvesting on Residential Water Use: Empirical Case Study. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 147, n. 4, 2021.
- LI, H.; SMITH, C. D.; COHEN, A.; WANG, L.; LI, Z.; ZHANG, X.; ZHONG, G.; ZHANG, R. Implementation of water safety plans in China: 2004–2018. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 223, n. 1, p. 106-115, 2020.

LI, P.; WU, J. Drinking water quality and public health. **Exposure and Health**, v. 11, n. 2, p. 73-79, 2019.

LIANG, Z. XU, X.; CAO, R.; WAN, Q.; XU, H.; WANG, J.; LIN, Y.; HUANG, T.; WEN, G. Synergistic effect of ozone and chlorine on the inactivation of fungal spores: factors and mechanisms of influence. **Journal of Hazardous Materials**, v. 420, 2021.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LUCENA, D. V. **Avaliação da segurança da água de abastecimento por soluções alternativas na zona rural de Campina Grande – PB**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2018.

MACHADO, A. V. M. SANTOS, J. A. N.; ALVES, L. M. C.; NORBERTHO, N. S. Contributions of organizational levels in community management models of water supply in rural communities: Cases from Brazil and Ecuador. **Water**, v. 11, n. 3, 2019.

MADAKUMBURA, G. D.; KIM, H.; UTSUMI, N.; SHIOGAMA, H.; FISCHER, E. M.; SELAND, O.; SCINOCCA, J. F.; MITCHELL, D. M.; HIRABAYASHI, Y.; OKI, T. Event-to-event intensification of the hydrologic cycle from 1.5 C to a 2 C warmer world. **Scientific Reports**, v. 9, 2019.

MAIA, I. L. B. O acesso a água potável como direito humano fundamental no direito brasileiro. **Revista do Centro de Estudos e Pesquisas Jurídicas (CEPEJ)**, n. 20, 2017.

MAINALI, J.; CHANG, H. Landscape and anthropogenic factors affecting spatial patterns of water quality trends in a large river basin, South Korea. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 26-40, 2018.

MALINGS, C.; TANZER, R.; HAURYLIUK, A.; SAHA, P. K.; ROBINSON, A. L.; PRESTO, A. A.; SUBRAMANIAN, R. Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation. **Aerosol Science and Technology**, v. 54, n. 2, p. 160-174, 2020.

MANASFI, T. Ozonation in drinking water treatment: an overview of general and practical aspects, mechanisms, kinetics, and byproduct formation. **Comprehensive Analytical Chemistry**, v. 92, p. 85-116, 2021.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n.2, p. 1973-1985, 2018.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

MARYATI, S.; FIRMAN, T.; HUMAIRA, A. N. S. A sustainability assessment of decentralized water supply systems in Bandung City, Indonesia. **Utilities Policy**, v. 76, p. 101373, 2022.

- MAZZUCATO, M. Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. **Industrial and Corporate Challenge**, v. 27, n. 5, p. 803-815, 2018.
- MBS (MALAWI BUREAU OF STANDARDS). **Malawi Bureau of Standards Borehole and Shallow Well Water Quality - Specification**. 1 ed. Blantyre: Malawi Bureau of Standards, 2005.
- McGRANAHAN, G.; MULENGA, M. Community organization and alternative paradigms for improving water and sanitation in deprived settlements. *In*: CASTRO, J.E.; HELLER, L. **Water and sanitation services. Public policy and management**. Londres: Earthscan, p. 173-187, 2009.
- MCNABB, D. E. Alternative Sources of Water Supply. *In*: **Global Pathways to Water Sustainability**. 1. ed. Switzerland: Springer Nature, p. 251-262, 2019.
- MECHA, A. C.; CHOLLOM, M. N. Photocatalytic ozonation of wastewater: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, n. 5, p. 1491-1507, 2020.
- MEDRANO PÉREZ, O. R. Ciudades Sobrecargadas: La Sobreexplotación De Recursos Como Limitante Del Desarrollo Sustentable. **Antípoda: Revista de Antropología y Arqueología**, v. 39, p. 3-12, 2020.
- METCALF; EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2016.
- MILLER, D. **Self-help and popular participation in rural water systems**. Paris: OECD, 1979.
- MIRANDA, J. MARQUES, R. C.; GUIMARÃES, A. L. **Temas de Direito da Água**. 2. ed. Lisboa: Instituto de Ciências Jurídico-políticas da Faculdade de Direito de Lisboa, 2019.
- MORETTO, D. L.; PANTA, R. E.; COSTA, A. B.; LOBO, E. A. Calibration of water quality index (WQI) based on Resolution nº 357/2005 of the Environment National Council (CONAMA). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 29-42, 2012.
- MPINDOU, G. O. M. K; ESCUDER BUENO, I.; CHORDÀ RAMÓN, E. Risk analysis methods for water supply systems: comprehensive review from source to tap. **Applied Water Science**, v. 12, n. 4, p. 56, 2022.
- MUKATE, S.; WAGH, V.; PANASKAR, D.; JACOBS, J. A.; SAWANT, A. Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water. **Ecological indicators**, v. 101, p. 348-354, 2019.
- MUREI, A.; MOGANE, B.; MOTHIBA, D.P.; MOCHWARE, O.T.W.; SEKGOBELA, J.M.; MUDAU, M.; MUSUMUVHI, N.; KHABO-MMEKOA, C.M.; MOROPENG, R.C.; MOMBA, M.N.B. Barriers to Water and Sanitation Safety Plans in Rural Areas of South Africa: A Case Study in the Vhembe District, Limpopo Province. **Water**, v. 14, n. 8, 2022.
- NAIK, R. K.; NAIK, M. M.; D'COSTA, P. M.; SHAIKH, F. Microplastics in ballast water as an emerging source and vector for harmful chemicals, antibiotics, metals, bacterial pathogens and HAB species: A potential risk to the marine environment and human health. **Marine Pollution Bulletin**, v. 149, 2019.

- NAIME, A. **Análise de riscos nos processos de licenciamento ambiental**. 1. ed. São Paulo: SENAC, 2019.
- NASCIMENTO, R. S. Simulação de alterações numa ETA convencional de porte médio para a produção de água segura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 439 – 450, 2016.
- NASIM, N.; EL-ZEIN, A.; THOMAS, J. A review of rural and peri-urban sanitation infrastructure in South-East Asia and the Western Pacific: Highlighting regional inequalities and limited data. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 244, 2022.
- O HERRERA, M. de la; LUNA, A. S.; COSTA, A. C. A.; LEMES, E. M. B. Risk Analysis: A generalized Hazop methodology state-of-the-art, applications, and perspective in the process industry. **Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia**, v. 6, n. 2, p. 106-121, 2018.
- ODAGIRI, M.; MUHAMMAD, Z.; CRONIN, A. A.; GNILO, M. E.; MARDIKANTO, A. K.; UMAM, K.; ASAMOU, Y. T. Enabling factors for sustaining open defecation-free communities in rural Indonesia: a cross-sectional study. **International journal of environmental research and public health**, v. 14, n. 12, 2017.
- ODIH, E. E.; AFOLAYAN, A. O.; AKINTAYO, I.; OKEKE, I. N. Could water and sanitation shortfalls exacerbate SARS-CoV-2 transmission risks? **The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 103, n. 2, p. 554, 2020.
- OGATA, I. S.; OLIVEIRA, R.; MEIRA, C. M. B. S.; NASCIMENTO, R. S.; HENRIQUE, J. A. Avaliação de risco à saúde associada à qualidade da água para 98 consumo humano em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 40, p. 1-15, 2016
- OLIVEIRA, A.; MAGALHÃES, T. B.; MATA, R. N.; SANTOS, F. S. G.; OLIVEIRA, D. C.; CARVALHO, J. L. B.; ARAÚJO, W. N. Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua): características, evolução e aplicabilidade. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 28, n. 1, 2019.
- OLIVEIRA, J. M. B. **Qualidade da água subterrânea na região do distrito industrial de São Luís – MA**. Dissertação (Mestrado em Saúde e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016.
- OLIVEIRA, J. S. C.; MEDEIROS, A. M.; CASTOR, L. G.; CARMO, R. F.; BEVILACQUA, P. D. Soluções individuais de abastecimento de água para consumo humano: questões para a vigilância em saúde ambiental. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 25, n. 2, p. 217 – 224, 2017.
- OLORUNTOBA, E. O.; WADA, O. Z.; ADEJUMO, M. Heavy metal analysis of drinking water supply, wastewater management, and human health risk assessment across secondary schools in Badagry coastal community, Lagos State, Nigeria. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 32, n. 9, p. 1897-1914, 2022.
- OPPENHEIMER, J.; SILVA, A.; YU, Z. L. T.; HANNA, M.; SUSILO, K. Total water solutions: capturing alternative water sources to supplement drinking water supply. **Journal American Water Works Association**, v. 109, n. 1, p. 18-25, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Programa da Década da Água da ONU-Água sobre Advocacia e Comunicação (UNW-DPAC): O direito humano à água e saneamento.** Espanha: ONU, 2015.

OYEBODE, O. J.; MUZAMMIL, M. Strategic evaluation of cost and benefit analysis of a rural water supply project: a case study of Dei-Dei community in Abuja, Nigeria. **Journal of Water Resources Engineering and Management**, v. 6, n. 2, p. 11-28, 2019.

PADRÓN, R. S.; GUDMUNDSSON, L.; DECHARME, B.; DUCHARNE, A.; LAWRENCE, D. M.; MAO, J.; PEANO, D.; KRINNER, G.; KIM, H.; SENEVIRATNE, S. I. Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. **Nature Geoscience**, v. 13, n. 7, p. 477-481, 2020.

PAIVA, R. F. P. S.; SOUZA, M. F. P. Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 34, n. 1, 2018.

PASSADOR, C. S.; PASSADOR, J. L. Apontamentos sobre as políticas públicas de combate à seca no Brasil: Cisternas e cidadania? **Cadernos Gestão Pública e Cidadania**, v. 15, n. 56, 2010.

PEREIRA, L. S. **O direito à água e sua proteção jurídica.** Jusbrasil, 2015. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/o-direito-a-agua-e-sua-protecao-juridica/189325531>. Acesso em: 10 abril 2024.

PHILIPPI JÚNIOR, A.; SOBRAL, M. C. **Gestão de bacias hidrográficas e sustentabilidade.** 1. ed. Barueri: Editora Monole, 2019.

PICHEL, N.; VIVAR, M.; FUENTES, M. The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. **Chemosphere**, v. 218, p. 1014-1030, 2019.

PINEDA, G. Y. F. **Gestão comunitária para abastecimento de água em áreas rurais: uma análise comparativa de experiências no Brasil e na Nicarágua.** 2013. Dissertação (Programa de pós graduação em saneamento, meio ambiente, recursos hídricos) – Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

POOI, C. K.; NG, Q. Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities. **NPJ Clean Water**, v. 1, n. 11, p. 1-8, 2018.

POSSELT, E. L.; COSTA, A. B.; LOBO, E. A. **Software IQAData 2015.** Registro no INPI BR 512015000890-0, Programa de Mestrado em Sistemas e Processos Industriais PPGSPI, Programa de Mestrado em Tecnologia Ambiental (PPGMTA), UNISC, 2015. Disponível em: <http://www.unisc.br/ppgspe>. Acesso em: 20 jan. 2023.

PREMJIT, Y.; SRUTHI, N. U.; PANDISELVAM, R.; KOTHAKOTA, A. Aqueous ozone: Chemistry, physiochemical properties, microbial inactivation, factors influencing antimicrobial effectiveness, and application in food. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 21, n. 2, p. 1054-1085, 2022.

RABELO, F. C. S.; MORAES, A. M.; LIRA, M. A. T.; SILVA, E. M. Estudo socioambiental do projeto de abastecimento de água com sistema fotovoltaico conectado à rede na

comunidade sítio volta, Jaguaruana, semiárido cearense. *In: Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2022, Florianópolis. Anais IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Florianópolis: CBENS, 2022. p. 1-9.

RAID, M. A.; HELLER, L.; MOURA, P. M.; GOMES, U. A. F. Modelos de prestação de serviços de abastecimento de água para comunidades rurais do Brasil: uma avaliação comparativa pelo método Analytic Hierarchy Process. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, p. 795-803, 2022.

RAMOS, G. M. O. M. **Evolução histórica da legislação brasileira sobre o uso da água**. Conteúdo Jurídico. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://conteudojuridico.com.br/consulta/Artigos/52115/evolucao-historica-da-legislacao-brasileira-sobre-o-uso-da-agua>. Acesso em: 15 ago. 2021.

REIS, C. A. S.; CARNEIRO, R. O Direito Humano à Água e a Regulação do Saneamento Básico no Brasil: Tarifa Social e Acessibilidade Econômica. **Desenvolvimento em Questão**, v. 19, n. 54, p. 123–142, 2021.

RAND, E. C.; FOSTER, T; SAMI, E.; SAMMY, E. Review of water safety planning processes and options for improved climate resilient infrastructure in Vanuatu. **Water Practice & Technology**, v. 17, n. 3, p. 675-683, 2022.

RIOS-TOBON, S.; AGUDELO-CADAVID, R. M.; GUTIERREZ-BUILES, L. A. Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. **Revista Facultad Nacional de Salud Pública**, v. 35, n. 2, p. 236-247, 2017.

RODRIGUES, K. C. T. T.; BARRINHA, R. N.; STADUTO, J. A. R.; WESTEREN, K. I. Os problemas de saneamento e seus impactos sobre a saúde pública. **International Journal of Environmental Resilience Research and Science**, v. 4, n.3, 2022.

ROLAND, N.; HELLER, L.; REZENDE, S. O Projeto Nacional de Saneamento Rural (1985-1989) no Brasil: limites e potencialidades. **Revista brasileira de estudos urbanos e regionais**, v. 24, 2022.

RUEDIGER, M. A. **Análise da efetividade do Água Para Todos: avaliação de mérito quanto à eficácia, à eficiência e à sustentabilidade**. Rio de Janeiro: FGV DAPP, 2018.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SANKHLA, M. S.; KUMAR, R.; BISWAS, A. Dynamic nature of heavy metal toxicity in water and sediments of Ayad River with climatic change. **International Journal of Hydrology**, v. 3, n. 5, p. 339-343, 2019.

SANTOS, K. F. Cisterna de polietileno x cisterna de placa: do combate à seca a convivência com o semiárido. **Sitientibus**, v. 54, 2019.

SCHMITT, J. F. A.; TAHIM, E. F.; TAVARES, J. C. DE S. Adoção de inovações no semiárido: um estudo com usuários de cisternas de polietileno. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 39–56, 2020.

SETTY, K.; FERRERO, G. Water safety plans. *In: Oxford Research Encyclopaedia of Global Public Health*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190632366.013.338>

SHANNON, M. A.; BOHN, P. W.; ELIMELECH, M.; GEORGIADIS, J. G.; MARÍÑAS, B. J.; MAYES, A. M. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, v. 452, n. 7185, p. 301-310, 2008.

SISTEMA DE INFORMACIÓN DE ÁGUA Y SANEAMIENTO RURAL. **Manual Usuario de SIASAR**. 2012. Disponível em:

https://siasar.fise.gob.ni/sites/default/files/documentos/Manual_SIASAR%201.0_0.pdf

Acesso em: 25 out. 2023.

SISTEMA DE INFORMACIÓN DE ÁGUA Y SANEAMIENTO RURAL. **Regulamento do sistema de água e saneamento rural**. 2016. Disponível em: <https://globalsiasar.org/pt-br>,

Acesso em: 25 out. 2023.

SILVA, C. C. A.; Gerenciamento de riscos ambientais. *In: JUNIOR, A. P.; ROMERO, M. A.; BRUNA, G. C. Curso de gestão ambiental*. 2. ed. São Paulo: Manole, p. 904 – 914, 2014.

SILVA, A. S. **Qualidade de água de abastecimento na zona rural de Santa Rita - PB e propostas de melhoria**. 2019. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) - João Pessoa, Paraíba, 2019.

SILVA, J. P.; BEZERRA, C. E.; RIBEIRO, A. A. Evaluation of the quality of water stored in cisterns in the cearenian semiarid. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 14, n.1, p. 27 – 35, 2020a.

SILVA, M. E. D.; ALCÓCER, J. C. A.; PINTO, O. R. O.; PINTO, C. M.; FONSECA, A. M. Percepção de beneficiários do Programa Cisternas: manuseio de águas em Ibaretama, Ceará. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 6, p. 37847-37867, 2020b.

SILVA, S. **Participação comunitária como estratégia de gestão de microbacia hidrográfica visando a sustentabilidade do abastecimento público de água**. 2022. Tese (Doutorado em desenvolvimento rural sustentável) - Unioeste, Marechal Cândido Rondon, 2022.

SILVA, J. Acesso e abastecimento de água rural no México e no Brasil. *Tecnologia e Ciências da Água*, v. 3, p. 349-389, 2024.

SILVEIRA, I. Á. **Estudo comparativo entre os métodos FMEA e HAZOP aplicados no processo de uma microcervejaria**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2022.

SISAR. **Sistema Integrado de Saneamento Rural**. 2024. Disponível em: <https://sisar.org.br/>. Acesso em: 10 dez. 2023.

SIWILA, S.; BRINK, I. C. A novel low-cost multi-barrier system for drinking water treatment in rural and suburban areas. *Water Practice and Technology*, v. 15, n. 1, p. 48-65, 2020.

SNYDER, K. A.; EVERS, L.; CHAMBERS, J. C.; DUNHAM, J.; BRADFORD, J. B.; LOIK, M. E. Effects of changing climate on the hydrological cycle in cold desert ecosystems of the

Great Basin and Columbia Plateau. **Rangeland Ecology & Management**, v. 72, n. 1, p. 1-12, 2019.

SONG, W.; GAO, Z.; HU, M.; WU, X.; JIA, Y.; LI, X.; HU, Y.; LIAO, L. Development and technology of rural drinking water supply in China. **Irrigation and Drainage**, v. 69, p. 187-198, 2020.

SOUSA, L.S.D.M.; SOUSA, F.F.G; HENRIQUES, J. A. Qualidade da água do sistema de abastecimento numa comunidade rural em município de pequeno porte no sudeste do Brasil. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 26, n. 21, 2022.

SOUSA, S. M. S. A tarifa social enquanto garante a acessibilidade e universalidade do direito à água. **Revista Eletrônica de Direito Público**, v. 6, n. 1, p. 166, 2019.

STEINER, A.; CALO, F.; SHUCKSMITH, M. Rurality and social innovation processes and outcomes: A realist evaluation of rural social enterprise activities. **Journal of Rural Studies**, v. 99, p. 284 – 292, 2023.

STOCHERO, E. L. M.; JACOBI, L. F.; LÚCIO, A. D. Imputação de dados na análise de variância em experimentos no delineamento inteiramente casualizado. **Ciência e Natura**, v. 42, 2020.

STRING, G. M.; SINGLETON, R. I.; MIRINDI, P. N.; LANTAGNE, D. S. Operational research on rural, community-managed water safety plans: case study results from implementations in India, DRC, Fiji, and Vanuatu. **Water research**, v. 170, p. 115288, 2020.

TABARI, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, 2020.

TAJIMA, H.; TAKEMURA, S.; HORI, J.; MAKINO, M.; SATO, T. Autonomous Innovations in Rural Communities in Developing Countries III-Leverage Points of Innovations and Enablers of Social-Ecological Transformation. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 12192, 2022

TANTOH, H. B.; MCKAY, T. J.M. Rural self-empowerment: The case of small water supply management in Northwest, Cameroon. **Geo Journal**, v. 85, n. 1, p. 159-171, 2020.

TOAN, T. D.; HANH, D. N.; THU, D. T. Management models and the sustainability of rural water supply systems: An analytical investigation in Ha Nam Province, Vietnam. **Sustainability**, v. 15, n. 12, 2023.

TRAN, V.V.; PARK, D.; LEE, Y.-C. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 8, 2020.

TRIBBE, J.; ZUIN, V.; DELAIRE, C.; KHUSH, R.; PELETZ, R. How do rural communities sustain sanitation gains? Qualitative comparative analyses of community-led approaches in Cambodia and Ghana. **Sustainability**, v. 13, n. 10, 2021.

TSARIDOU, C.; KARABELAS, A. J. Drinking Water Standards and Their Implementation: A Critical Assessment. **Water**, v. 13, n. 20, p. 2918, 2021.

TYAGI, S.; SHARMA, B.; SINGH, P.; DOBHAL, R. Water quality assessment in terms of water quality index, **American Journal of Water Resources**, n. 1, p. 34-38, 2013.

UDDIN, M. G.; NASH, S.; OLBERT, A. I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. **Ecological Indicators**, v. 122, 2021.

VENTURA, K. S.; FILHO, P. V.; NASCIMENTO, S. G. Plano de segurança da água implementado na estação de tratamento de água de Guaraú, em São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 109 – 119, 2019.

VERÇOSA, L. F. M. **Avaliação de risco de reservatórios de distribuição de água de sistema de abastecimento de médio porte**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba, 2017.

VIANNA, L. F. V. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Belo Horizonte, 2015.

WEN, X.; CHEN, F.; LIN, Y.; ZHU, H.; YUAN, F.; KUANG, D.; JIA, Z.; YUAN, Z. Microbial indicators and their use for monitoring drinking water quality-A review. **Sustainability**, v. 12, n. 6, 2020.

WESTERHOFF, P.; BOYER, T.; LINDEN, K. Emerging water technologies: Global pressures force innovation toward drinking water availability and quality. **Accounts of chemical research**, v. 52, n. 5, p. 1146-1147, 2019.

WHITTINGTON, D.; RADIN, M.; JEULAND, M. Evidence-based policy analysis? The strange case of the randomized controlled trials of community-led total sanitation. **Oxford Review of Economic Policy**, v. 36, n. 1, p. 191-221, 2020.

WOOD, S. A. *et al.* Toxic benthic freshwater cyanobacterial proliferations: Challenges and solutions for enhancing knowledge and improving monitoring and mitigation. **Freshwater biology**, v. 65, n. 10, 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION and INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION. **Water safety plan manual: Step-by-step risk management for drinking-water suppliers**. Geneva: WHO and IWA, 2009.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Progress on Sanitation and Drinking-water**. Geneva: WHO, 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. 4th Ed. Geneva: WHO, 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **UN-Water global analysis and assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS) 2017: Financing universal water, sanitation and hygiene under the sustainable development goals**. Geneva: WHO, 2017a.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Diretrizes para a qualidade da água potável**. 4^a edição. Geneva: WHO, 2017b.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality**. Geneva: WHO, 2021.

XIANG, X.; LI, Q.; KHAN, S.; KHALAF, O. I. Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 86, 2021.

ZANACIC, E.; STAVRINIDES, J.; MCMARTIN, D. W. Field-analysis of potable water quality and ozone efficiency in ozone-assisted biological filtration systems for surface water treatment. **Water Research**, v. 104, p. 397-407, 2016

ZEINALI, M.; AZARI, A.; HEIDARI, M. M. Multiobjective optimization for water resource management in low-flow areas based on a coupled surface water–groundwater model. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 5, 2020.

ZHANG, Q.; XU, P.; QIAN, H. Groundwater quality assessment using improved water quality index (WQI) and human health risk (HHR) evaluation in a semi-arid region of northwest China. **Exposure and health**, v. 12, n. 3, p. 487-500, 2020.

ZUBAIDI, S. L.; ZUBAIDI, S.; ORTEGA MARTORELL, S.; KOT, P.; AL KHADDAR, R. M.; ABDELLATIF, M.; GHARGHAN, S.; AHMED, M.; HASHIM, K. S. A method for predicting long-term municipal water demands under climate change. **Water Resources Management**, v. 34, n. 3, p. 1265-1279, 2020.

ZULKIFLI, S.N.; RAHIM, H. A.; LAU, W.J. Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 255, p. 2657-2689, 2018.

APÊNDICE A – Detalhamento da análise de coliformes totais

Tabela 20 – Resultados das análises de coliformes totais

Coliformes totais						
Data	Água Bruta Cisterna	Ozônio - Cisterna	Água Bruta Poço	Ozônio – Poço	Água Bruta - Açude	Ozônio - Açude
09/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
16/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
23/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
30/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
06/02/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
13/02/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
21/02/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
06/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
13/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
20/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
27/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
04/04/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
25/04/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
02/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
09/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
16/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
23/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
29/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
05/06/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
12/06/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente
19/06/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente
03/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente
10/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
17/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente
24/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
31/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
07/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
14/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
21/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
28/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente

Fonte: O autor (2024).

APÊNDICE B – Detalhamento da análise de *Escherichia coli*

Tabela 21 – Resultados das análises de *Escherichia coli*

<i>Escherichia coli</i>						
Data	Água Bruta Cisterna	Ozônio - Cisterna	Água Bruta Poço	Ozônio – Poço	Água Bruta - Açude	Ozônio - Açude
09/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
16/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
23/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
30/01/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
06/02/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
13/02/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
21/02/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
06/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
13/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
20/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
27/03/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
04/04/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
25/04/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
02/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
09/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
16/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
23/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
29/05/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
05/06/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
12/06/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente
19/06/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente
03/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Presente
10/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
17/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
24/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
31/07/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
07/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
14/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
21/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente
28/08/2023	Presente	Ausente	Presente	Ausente	Presente	Ausente

Fonte: O autor (2024).