



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**MODELO DE ANÁLISE DE RISCO APLICADO A PLANOS DE
SEGURANÇA DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM
COMUNIDADES RURAIS**

AYRTON FLAVIO NASCIMENTO DE SOUSA

CAMPINA GRANDE – PB

2024

AYRTON FLAVIO NASCIMENTO DE SOUSA

**MODELO DE ANÁLISE DE RISCO APLICADO A PLANOS DE SEGURANÇA DA
ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM COMUNIDADES RURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais na área de concentração de Engenharia de Recursos Naturais.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Naturais

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Hermínio Cunha

CAMPINA GRANDE – PB

2024

S725m Sousa, Ayrton Flavio Nascimento de.
Modelo de análise de risco aplicado a planos de segurança da água para consumo humano em comunidades rurais / Ayrton Flavio Nascimento de Sousa. – Campina Grande, 2024.
129 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.
"Orientação: Profa. Dra. Patrícia Hermínio Cunha".
Referências.

1. Sistema de Inferência *fuzzy*. 2. *Failure Mode and Effects Analysis - FMEA*. 3. Plano de Segurança da Água - PSA. 4. Eventos Perigosos. 5. Abastecimento de Água. 6. Soluções Alternativas Coletivas. 7. Comunidades Rurais. I. Cunha, Patrícia Hermínio. II. Título.

CDU 628.1(1-22)(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

Ayrton Flavio Nascimento de Sousa

**“MODELO DE ANÁLISE DE RISCO APLICADO A PLANOS DE SEGURANÇA DA
ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM COMUNIDADES RURAIS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de Mestre Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 30/08/2024

Dr.(a.) **Patrícia Hermínio Cunha Feitosa** (Orientador PPGEGRN).

Dr.(a.) **Vera Lucia Antunes de Lima/PPGEGRN**(Examinador Interno).

Dr.(a.) **Welton Brito dos Santos/UEPB** (Examinador Externo).



Documento assinado eletronicamente por **PATRICIA HERMINIO CUNHA FEITOSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/08/2024, às 10:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/09/2024, às 21:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Whelton Brito dos Santos, Usuário Externo**, em 30/09/2024, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4727429** e o código CRC **4BA6E255**.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata da Trigesima Sexta sessão pública de Defesa de Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais – PPGEGRN do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Ao Trinta dia do mês de Agosto de 2024, às 09:00 horas, **de forma presencial** reuniu-se na forma e Termos do Art. 62 do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação “Stricto Sensu” da UFCG e do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Resolução 02/2019 do Colegiado Pleno do Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão – CONSEPE/UFCG, a Banca Examinadora composta pelos professores/pesquisadores Prof.(a) Dr.(a) **Patrícia Hermínio Cunha Feitosa**, como orientador(a) principal; Prof.(a.) Dr.(a.) **Vera Lucia Antunes de Lima/PPGEGRN** como membro interno; Prof.(a.) Dr.(a) **Welton Brito dos Santos/UEPB**, como membro externo, a qual foi constituída pela Portaria **PPGEGRN 44/2024** da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, juntamente com **Ayrton Flavio Nascimento de Sousa** candidato(a) ao Grau de **Mestre** em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais. Abertos os trabalhos, o(a) Senhor (a) Presidente da Banca Examinadora, Prof.(a.) Dr(a). **Patrícia Hermínio Cunha**, anunciou que a sessão tinha a finalidade de julgamento da apresentação e de defesa da **Dissertação** sob o título: **“MODELO DE ANÁLISE DE RISCO APLICADO A PLANOS DE SEGURANÇA DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM COMUNIDADES RURAIS”** Área de Concentração: **Engenharia de Recursos Naturais** orientada pelo(a) Professor(a) Dra. **Patrícia Hermínio Cunha**. O(A) presidente concedeu à palavra o(a) candidato(a) para, no prazo de tempo estipulado, efetuar a apresentação de seu trabalho. Concluída a exposição do(a) candidato(a), o(a) Presidente iniciou a segunda etapa do processo de defesa passando a palavra a cada membro da Banca Examinadora para as devidas considerações, correções e arguição do(a) candidato(a). Em seguida, a Banca Examinadora solicitou a saída dos presentes para, em sessão secreta, avaliar a apresentação e defesa. Após chegar a uma decisão final, a Banca Examinadora solicitou o retorno da Assembleia e anunciou, de conformidade com o que estabelece o Art. 57 do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, o Conceito **APROVADO**, o qual será

atribuído após O(a) candidato(a), no prazo máximo de 30 (trinta) dias, efetuar as correções e modificações sugeridas e aprovadas pela Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar pelo Coordenador, pelo candidato e pelos membros da Banca Examinadora.

Campina Grande,
30 de Agosto de 2024.

Assinaturas:

Coordenadora do PPGEGRN _____

Candidato(a) _____

Presidente _____

Examinador _____

Examinador _____

Examinador _____

Examinador _____



Documento assinado eletronicamente por **PATRICIA HERMINIO CUNHA FEITOSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/08/2024, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/09/2024, às 21:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Whelton Brito dos Santos, Usuário Externo**, em 03/09/2024, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4727392** e o código CRC **05D43A53**.

Referência: Processo nº 23096.049056/2024-21

SEI nº 4727392

Dedico à todos que estiveram comigo ao longo do mestrado e não mediram esforços para que eu pudesse concluir mais uma etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre acreditou no meu potencial e me apoiou em cada etapa ao longo do mestrado. Em especial aos meus pais, Shirleide e Flavio, por toda compreensão e cuidado nos momentos difíceis, vocês me dão forças para acreditar que sempre é possível. Ao meu irmão, Allan, que me incentivou e esteve sempre junto comigo trazendo alegria em cada momento. Cada um de vocês é especial e fez com que isso acontecesse.

Aos meus colegas e amigos de trabalho, pela troca constante de conhecimentos e pelo apoio emocional em momentos de desafio. As conversas, colaborações e, por vezes, descontrações, foram importantes para manter a motivação ao longo do mestrado. Obrigado por não me deixarem desistir e terem sido o ponto de apoio quando eu precisei. Foram anos muito felizes, com muitas viagens cansativas, mas sempre bem-sucedidas.

À professora Patrícia Hermínio, por ter aceitado a orientação do trabalho. Agradeço por toda ajuda ao longo do processo, contribuindo para o meu crescimento acadêmico e pessoal durante os anos da pesquisa. Aos professores Whelton Brito e Vera Lucia, que aceitaram avaliar este trabalho, suas contribuições e arguições sempre serão agregadoras para este estudo.

À Fundação Nacional de Saúde, que financiou o TED n° 06/2021, de onde surgiu a motivação para pesquisar em áreas rurais, permitindo obter de dados e informações relevantes para realização deste trabalho. Por fim, agradeço a todas as pessoas e instituições que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação. Este trabalho é fruto de um esforço coletivo, e sou profundamente grato a todos que fizeram parte desta trajetória.

RESUMO

No Brasil, o acesso à água segura é dificultado não só por fenômenos climáticos, como também pelas deficiências na gestão pública, resultando em desigualdades entre áreas rurais e urbanas. O Programa Nacional de Saneamento Rural enfatiza a importância do Plano de Segurança da Água (PSA) para garantir água potável em áreas rurais. Esta implementação enfrenta desafios técnicos, operacionais e de governança, especialmente em pequenos sistemas e áreas dispersas. Portanto, o objetivo deste trabalho é propor um modelo de análise de risco à segurança da água baseado em Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) e lógica fuzzy como instrumento na elaboração de PSAs de sistemas e soluções alternativas de abastecimento em comunidades rurais. Para a realização do estudo, foram selecionadas duas comunidades rurais do estado do Ceará. Na primeira etapa, foram identificados os perigos e eventos perigosos presentes no sistema de abastecimento de água e nas soluções alternativas coletivas das comunidades selecionadas. Em seguida, foi construído um modelo fuzzy do tipo Mamdani, a partir das variáveis de entrada do FMEA tradicional (ocorrência, severidade e detecção). A inferência fuzzy foi dividida em duas fases, para reduzir o número de regras e obter um modelo mais representativo. Na fase de defuzzificação, foi utilizado o método do centro de gravidade de área (CGA), que converte os valores fuzzy em um valor numérico real, utilizado para a priorização dos eventos perigosos. Por fim, foi realizada a validação do modelo por meio de análise comparativa com a metodologia sugerida pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Os eventos perigosos identificados nas comunidades foram decorrentes de falta de infraestrutura adequada, falhas na operação e gestão, atividades humanas inadequadas e condições ambientais adversas. Foi possível obter descrições dos termos linguísticos condizentes com a realidade rural, que, associadas a utilização de funções de pertinência triangulares e trapezoidais, proporcionou uma representação clara e intuitiva dos riscos para o PSA. A aplicação do modelo nos sistemas e soluções de abastecimento de água escolhidos permitiu uma avaliação mais detalhada e ajustada à realidade local pela abordagem Fuzzy-FMEA, solucionando a subjetividade associada às respostas aos especialistas na avaliação de risco, bem como as situações de empates que ocorrem na utilização da metodologia tradicional de matriz de priorização. Quando comparado a metodologia sugerida pela OMS, o modelo pode subsidiar a tomada de decisões de maneira mais efetiva quanto às medidas de controle necessárias para mitigar os riscos associados aos eventos perigosos.

Palavras-chave: sistema de inferência *fuzzy*; *Failure Mode and Effects Analysis*; plano de segurança da água; eventos perigosos; abastecimento de água.

ABSTRACT

In Brazil, access to safe water is hindered not only by climatic phenomena but also by deficiencies in public management, resulting in inequalities between rural and urban areas. The National Rural Sanitation Program emphasizes the importance of the Water Safety Plan (WSP) to ensure potable water in rural areas. However, the implementation faces technical, operational, and governance challenges, particularly in small systems and dispersed areas. Therefore, the aim of this study is to propose a risk analysis model for water safety based on Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and fuzzy logic as a tool for developing WSPs for systems and alternative water supply solutions in rural communities. Two rural communities in the state of Ceará were selected for the study. In the first stage, the hazards and dangerous events present in the water supply system and collective alternative water solutions of the selected communities were identified. Next, a Mamdani-type fuzzy model was constructed based on the input variables of the traditional FMEA (occurrence, severity, and detection). Fuzzy inference was divided into two phases to reduce the number of rules and obtain a more representative model. In the defuzzification phase, the center of gravity area (CGA) method was used, which converts fuzzy values into a real numerical value, used for prioritizing dangerous events. Finally, the model was validated through comparative analysis with the methodology suggested by the World Health Organization (WHO). The dangerous events identified in the communities were due to a lack of adequate infrastructure, operational and management failures, inadequate human activities, and adverse environmental conditions. It was possible to obtain descriptions of linguistic terms consistent with rural reality, which, combined with the use of triangular and trapezoidal membership functions, provided a clear and intuitive representation of the risks for the WSP. The application of the model in the selected water supply systems and solutions allowed for a more detailed and adjusted evaluation of the local reality through the Fuzzy-FMEA approach, solving the subjectivity associated with expert responses in risk assessment, as well as tie situations that occur with the traditional prioritization matrix methodology. When compared to the WHO suggested methodology, the model can support decision-making more effectively regarding the control measures needed to mitigate the risks associated with dangerous events.

Keywords: fuzzy inference system; Failure Mode and Effects Analysis; water safety plan; dangerous events; water supply.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas de elaboração de planos de segurança da água.....	37
Quadro 2 – Comunidades rurais participantes do TED nº 06/2021 Funasa/UFCG.....	48
Quadro 3 - Termos linguísticos da probabilidade de ocorrência, severidade das consequências e detecção dos eventos perigosos	53
Quadro 4 – Base de regras para o primeiro SIF	55
Quadro 5 – Base de regras para o segundo SIF.....	57
Quadro 6 – Eventos perigosos identificado na captação – Lagoa dos Encantos	61
Quadro 7 – Eventos perigosos identificados no tratamento – Lagoa dos Encantos.....	64
Quadro 8 – Eventos perigosos identificados na reservação – Lagoa dos Encantos.....	65
Quadro 9 – Eventos perigosos identificados na distribuição – Lagoa dos Encantos	68
Quadro 10 – Eventos perigosos identificados na captação – Cantinho.....	71
Quadro 11 – Eventos perigosos identificados no tratamento – Cantinho	72
Quadro 12 – Eventos perigosos identificados na reservação – Cantinho	74
Quadro 13 – Eventos perigosos identificados na coleta e manuseio da água – Cantinho.....	75
Quadro 14 – Termos linguísticos da probabilidade da ocorrência de eventos perigosos	76
Quadro 15 – Termos linguísticos da severidade das consequências dos eventos perigosos...	78
Quadro 16 – Termos linguísticos da detecção dos eventos perigosos	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema simplificado de abastecimento de água	27
Figura 2 – Exemplos de soluções alternativas coletivas de abastecimento de água	29
Figura 3 – Sistema de inferência Fuzzy	43
Figura 4 – Exemplo de Sistema de Inferência Fuzzy de Mamdani	45
Figura 5 – Etapas necessárias à realização do estudo.....	47
Figura 6 – Mapa de Localização	49
Figura 7 – Mapa de Localização	60
Figura 8 – Etapas da ETA de Lagoa dos Encantos	63
Figura 9 – Mapa da rede de distribuição do SAA Lagoa dos Encantos	67
Figura 10 – Diagrama de fluxo das SAC de Cantinho	69
Figura 11 – Estado de conservação das bombas de captação – Cantinho	70
Figura 12 – Mapa das soluções alternativas coletivas de Cantinho	73
Figura 13 – Estado de conservação das estruturas de reservação – Cantinho.....	74
Figura 14 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do primeiro (a) e segundo (b) SIF	81
Figura 15 – Gráfico de superfície do primeiro (a) e segundo (b) SIF	82
Figura 16 – Funções de pertinência ativadas para a Ocorrência e Severidade.....	84
Figura 17 – Regras ativadas para entupimentos e/ou assoreamentos na área de captação.....	85
Figura 18 – Centro de gravidade de área para as regras ativadas.....	85
Figura 19 – <i>Slope chart</i> comparativo entre a metodologia tradicional e a FRPN – Lagoas ...	91
Figura 20 – <i>Slope chart</i> comparativo entre a metodologia tradicional e a FRPN – Cantinho	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de avaliação dos riscos do FRPN	57
Tabela 2 – Matriz de avaliação dos riscos sugerida pela OMS	58
Tabela 3 – Domínios dos termos linguísticos.....	79
Tabela 4 – Comparação dos eventos perigosos R.5 e D.9.....	92
Tabela 5 – Comparação dos eventos perigosos U.5, R.7, C.7, T.7 e T.5	99

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	Analytic Hierarchy Process
AIAG	Automotive Industry Action Group
ANA	Agência Nacional de água e Saneamento
APPCC	Análise de Perigo e Pontos Críticos de Controle
Cesb	Companhias Estaduais de Saneamento Básico
CGA	Centro de Gravidade de Área
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FRPN	Número de Priorização de Risco Fuzzificado
FTA	Análise de Árvore de Falhas
Funasa	Fundação Nacional de Saúde
GM	Gabinete Ministerial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEC	International Electrotechnical Commission
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IWA	International Water Association
Máx	Máximo
Mín	Mínimo
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSR	Plano Nacional de Saneamento Rural
POP	Procedimentos Operacionais Padrões
PRE	Planos de Respostas a Emergência
PSA	Plano de Segurança de Água
RCI	Índice de Criticidade de Risco
REAL-Water	Rural Evidence and Learning for Water

RPN	Número de Priorização de Risco
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SAC	Soluções Alternativas Coletivas
SAI	Soluções Alternativas Coletivas Individuais
SIF	Sistema de Inferência Fuzzy
Sisagua	Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano
SISAR	Sistema Integrado de Saneamento Rural
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TED	Termo de Execução Descentralizada
TMF	Funções de pertinência triangulares
TMRF	Funções de pertinência trapezoidais
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
WHO	World Health Organization

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	20
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL.....	21
2.1.1 <i>Marcos legais correlatos ao saneamento</i>	21
2.1.2 <i>Saneamento Rural</i>	23
2.2 ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM COMUNIDADES RURAIS.....	25
2.2.1 <i>Sistemas de abastecimento de água em áreas rurais</i>	27
2.2.2 <i>Soluções alternativas coletivas e suas infraestruturas</i>	28
2.2.3 <i>Qualidade da água em comunidades rurais</i>	29
2.2.4 <i>Gestão compartilhada em sistemas rurais de abastecimento de água</i>	32
2.3 PLANOS DE SEGURANÇA DA ÁGUA.....	34
2.3.1 <i>Implantação dos planos de segurança da água</i>	35
2.3.2 <i>Metodologia de elaboração de planos de segurança da água</i>	37
2.4 AVALIAÇÃO DE RISCO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	39
2.5 <i>FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS</i>	40
2.6 TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY.....	42
2.6.1 <i>Sistema de inferência fuzzy</i>	43
3. METODOLOGIA.....	46
3.1 DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
3.2 PRIMEIRA ETAPA: PERIGOS E EVENTOS PERIGOSOS	50
3.3 SEGUNDA ETAPA: CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS FUZZY	52
3.4 TERCEIRA ETAPA: PRIORIZAÇÃO DOS EVENTOS PERIGOSOS – FMEA-FUZZY	54
3.5 QUARTA ETAPA: ANÁLISE COMPARATIVA	58
4. RESULTADOS.....	59
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA	59
4.1.1 <i>Sistema de abastecimento de água Lagoa dos Encantos</i>	59
4.1.2 <i>Soluções alternativas coletivas de Cantinho</i>	68
4.2 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY	76
4.2.1 <i>Descrição dos termos linguísticos</i>	76
4.2.2 <i>Funções de pertinência</i>	79
4.2.3 <i>Gráfico de superfície da base de regras</i>	82

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO NO PSA	83
4.3.1 SAA Lagoa dos Encantos.....	86
4.3.2 SAC Cantinho	93
5. CONCLUSÕES.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÊNDICES	121

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de recursos hídricos, com qualidade e em quantidades adequadas, é essencial para o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida dos seres humanos. Entretanto, no cenário mundial, em 2022, uma em cada quatro pessoas ainda não possuía acesso a água gerida de forma segura e cerca de 703 milhões de pessoas careciam de serviços básicos de abastecimento (UNICEF, 2023). Para combater essa realidade, o 6º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, foi definido com enfoque na garantia de água com qualidade a todos, o que envolve a distribuição de água com instalações acessíveis, disponibilidade contínua e livre de contaminação (Cadore; Tochetto, 2021).

O Brasil sofre graves problemas de escassez de água, devido às suas dimensões geográficas e diversidade climática. Na região do semiárido, a irregularidade do regime de precipitação pluviométrica associada à escassez de água e as altas taxas de evapotranspiração contribuem para reduzir a disponibilidade hídrica e favorecem a concentração de solutos nas fontes hídricas superficiais, degradando a qualidade das águas. Além disso, há existem problemas de contaminação da água pelo lançamento de esgotos sem tratamento no solo e nas águas superficiais, contaminando a água disponível para consumo humano nessas localidades (Brito; Silva; Porto, 2017).

As dificuldades de acesso à água segura nessa região são expressivas, não limitadas apenas aos fenômenos climáticos, mas também associadas a problemas de gestão deste recurso por parte do poder público. Andrade e Nunes (2014) ressaltam a necessidade de atuação integrada e intervenções públicas para superar as desigualdades existentes na oferta do serviço de abastecimento de água para áreas desfavorecidas geográfica e demograficamente.

Essa disparidade pode ser percebida observando a taxa de atendimento adequado do serviço na zona rural, que apesar de ter crescido de 27,8%, em 2010, para 40,5%, em 2019, ainda está distante da realidade das áreas urbanas que atendeu 92,9% da população com sistema de abastecimento de água (SAA) no mesmo ano (SNIS, 2019).

Embora a situação do abastecimento de água nos domicílios rurais brasileiros tenha apresentado aumento sistemático na presença de rede de distribuição nos últimos anos, principalmente por meio da captação de águas subterrâneas com a perfuração de poços, há, ainda, a precarização dos serviços nessas áreas, de modo a instigar a busca por outras fontes

inseguras de abastecimento pela população (Araújo *et al.*, 2022). Na região Nordeste, o uso das soluções alternativas coletivas (SAC) e múltiplas fontes de abastecimento, como cisternas, poços coletivos, chafarizes, se tornou frequente, devido à insuficiência ou baixa qualidade da água disponível para as comunidades rurais (Brasil, 2019).

Tendo em vista a necessidade de garantir saneamento básico às comunidades rurais, a Fundação Nacional de Saúde (Funasa) criou o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) que trata, em sua 7ª diretriz, da “efetivação do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano em soluções alternativas coletivas e individuais de abastecimento de água nas áreas rurais”, com a finalidade de assegurar a população rural o acesso a água potável segura e de qualidade, por meio da implementação do Plano de Segurança da Água (PSA) (Brasil, 2019).

Descrito nas diretrizes da Organização Mundial de Saúde (OMS) para qualidade da água potável como a forma mais eficaz de garantir a segurança do abastecimento, o PSA fornece subsídio ao poder público para que seja efetivada a garantia de inclusão social na melhoria da distribuição de água segura. Para garantir uma boa gestão dos recursos hídricos, o PSA segue uma abordagem preventiva e colaborativa, considerando as características do sistema de abastecimento como um todo, a partir da identificação de perigos e análise de riscos (Setty; Ferrero, 2021; WHO, 2019; 2023a).

Uma abordagem holística para a avaliação e gestão de riscos no que concerne o abastecimento de água potável em determinada localidade aumenta a confiança na segurança que esta oferece à população. Esta abordagem envolve uma avaliação sistemática dos riscos em todas as etapas do abastecimento, desde a captação na fonte de água até a distribuição para o consumidor. Além disso, é importante identificar as maneiras pelas quais esses riscos podem ser gerenciados, incluindo métodos para garantir a efetividade das medidas de controle adotadas no sistema (WHO, 2017).

Outrossim, a falta de informações acerca do abastecimento de comunidades rurais aumenta a incerteza nas decisões por parte do poder público, acarretando resultados negativos na prestação do serviço. Dessa forma, a avaliação de risco torna-se uma importante ferramenta de gestão para o controle e vigilância da qualidade de água, sendo capaz de identificar falhas ou deficiências nos sistemas, a partir de consulta a especialistas. Para o PSA recomenda-se a utilização de metodologias qualitativas ou semiquantitativas baseadas na opinião de

especialistas, como Análise de Perigo e Pontos Críticos de Controle (APPCC), Análise de Árvore de Falha (FTA), Matriz de Priorização de Risco, Análise de Modo de Falha e Efeitos (FMEA), entre outras (Brasil, 2012; WHO, 2023a).

Todavia, a limitação de informações, a variação na percepção, a falta de experiência prática e a complexidade dos sistemas podem acarretar incertezas e imprecisão associadas às respostas dos especialistas. Para alcançar maior robustez na avaliação de risco, outros métodos podem ser integrados a análise de risco, mas a abordagem ideal para atuar na redução da subjetividade pode variar, a depender do contexto e da natureza do risco (Leite, 2019). Algumas alternativas, como a incorporação da lógica *fuzzy*, que lida com informações imprecisas e incertas, a partir da modelagem de sistemas complexos com regras difusas, podem contribuir com a assertividade de um modelo de avaliação efetivo (Morgan; Henrion, 1992; Sofiste; Duarte, 2022).

Desse modo, este trabalho visa contribuir a partir da proposição de um modelo de análise de risco que incorpora a lógica *fuzzy* ao FMEA, a fim de aprimorar a priorização dos eventos perigosos associados ao abastecimento de água em comunidades rurais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de análise de risco à segurança da água como instrumento de apoio na elaboração de Planos de Segurança da Água (PSA) de sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento em comunidades rurais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elencar os possíveis os eventos perigosos que podem comprometer a qualidade, disponibilidade e aceitabilidade da água em comunidades rurais;
- Propor fatores de avaliação de risco que sejam adequados à realidade do abastecimento de água em ambientes rurais e que permitam o entendimento ao contexto hídrico nessas localidades;
- Aprimorar a gestão de risco nos SAAs ou SACs de comunidades rurais, por meio da incorporação da lógica *Fuzzy* ao *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), de modo a reduzir a subjetividade e a imprecisão associada às respostas de especialistas;

- Definir o modelo de priorização dos riscos e medidas de segurança mais adequado à realidade de comunidades rurais, a partir de análise comparativa com a metodologia sugerida pela OMS.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL

2.1.1 Marcos legais correlatos ao saneamento

O saneamento seguro é essencial para a manutenção da saúde da população, de modo a contribuir para a redução da transmissão de doenças de veiculação hídrica, bem como para melhorar e manter o bem-estar social (WHO, 2018). Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) (2021), quase metade da população mundial carecia de serviços de saneamento gerenciados com segurança no ano de 2020, o que acarretou 423.000 mortes por doenças diarreicas globalmente. Assim, a inclusão do saneamento nas políticas de saúde se faz necessário para a prevenção primária de doenças, permitindo a coordenação e integração em programas de saúde, com o objetivo de garantir a universalização da prestação de serviços de saneamento básico.

A instituição de políticas públicas efetivas voltadas ao saneamento é prevista nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por meio do Objetivo 6 que visa “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos” até o ano de 2030. Os benefícios da aplicação destas políticas vão além da redução do risco de doenças e incluem, entre outros, maior dignidade e segurança à população, além do fortalecimento institucional, visto que o saneamento é um serviço de natureza pública. Contudo, evidências sugerem que apenas a melhoria das instalações sanitárias podem não levar aos benefícios de saúde desejados, visto que há a necessidade de arcabouço legal que sustentem a efetividade das ações (Penteado; Branchi, 2023; WHO, 2021).

O déficit sanitário enfrentado pelo Brasil na década de 1910, principalmente nas regiões interioranas, promoveu a criação do movimento sanitário brasileiro, que buscou redefinir as fronteiras entre o rural e o urbano, a partir de reforma sanitária e criação de políticas de saúde e saneamento com abrangência nacional (Hochman, 2012). Entretanto, só na década de 1970 foi instituído o Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) e criadas as companhias estaduais de saneamento básico (Cesbs), com o intuito de reverter os baixos índices de cobertura dos

serviços de saneamento no País, a partir de soluções práticas ajustadas a realidade local. As ações do PLANASA foram executadas principalmente para o abastecimento de água, mantendo-se o déficit no esgotamento sanitário, coleta de resíduos e drenagem urbana (Rocha, 2016).

A instituição da Constituição Federal de 1988 apresentou como competência da União, no artigo 21, parágrafo XX, o dever de “instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, saneamento básico e transportes urbanos” (Brasil, 2016). Entretanto, desde a década de 1980, quando o PLANASA foi extinto, houve longo hiato sem regulamentação legal para o saneamento, que afetou na evolução e universalização do setor, devido ao declínio dos investimentos públicos à medida que o Brasil passara por crise fiscal (Coutinho, 2020). Apenas em 2007 foram estabelecidas as diretrizes nacionais para o saneamento básico, por meio da Lei Federal nº 11.445/2007.

A Lei supracitada promoveu importantes avanços no tratamento normativo do saneamento básico como a instituição dos princípios fundamentais, obrigatoriedade de previsão de normas de regulação, obrigatoriedade de elaboração dos planos municipais de saneamento, instauração do controle social, permissão para prestação de serviços por meio de contratos, entre outros. Apesar dos avanços, o Brasil ainda apresentara carências na prestação de serviços, com disparidades regionais, estaduais e municipais, além de possuir heterogeneidade no atendimento urbano e rural (Capanema, 2022; Ferreira; Gomes; Dantas, 2021).

A Lei Federal 11.445/2007 foi atualizada pela Lei Federal 14.026/2020 e define saneamento básico como o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais. A partir da atualização, o Artigo 11-B instituiu que os contratos de prestação de serviços deverão definir metas de universalização que garantam 99% de atendimento da população com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto até 2033. As Leis supracitadas devem atuar em conjunto com o Decreto Federal nº 11.599/2023, que dispõe sobre a prestação regionalizada dos serviços, bem como a alocação de recursos públicos e o apoio técnico e financeiro.

A prestação regionalizada visa contribuir na universalização dos serviços, bem como proporcionar viabilidade técnica e econômico-financeira para os municípios, incluindo aqueles menos capacitados nesses aspectos. As empresas prestadoras de serviços não poderão se

encarregar somente daqueles municípios com potencial lucrativo, mas terão que oferecer os serviços a todos que compõem a estrutura regionalizada, nos ambientes urbanos e rurais (Pastina *et al.*, 2022). Vale ressaltar que, quando a prestação regionalizada envolver populações rurais, originárias e tradicionais, a estrutura de governança deve abarcar outras instâncias de governança criadas para a gestão de saneamento nessas áreas, com direito a voto nas tomadas de decisão (Brasil, 2023).

Apesar dos desafios de implantação e disseminação dos marcos regulatórios, estes proporcionaram avanços que são notados na avaliação dos indicadores dos ODS, que apresentou evolução no percentual de população que utiliza serviços de água potável geridos de forma segura, variando de 89,5%, em 2006, para 97,4% no ano de 2019. Quanto à população que utiliza os serviços de esgotamento sanitário geridos de forma segura, em 2009 o percentual era de 53,0%, atingindo 72,2% em 2019, entretanto os avanços em áreas rurais ainda são incipientes se comparado às áreas urbanas (ANA, 2022; Pescke; Perez; Lara, 2022).

2.1.2 Saneamento Rural

A universalização do saneamento básico proposta no Marco Legal deve envolver tanto as áreas urbanas quanto as rurais, onde residiam mais de 32 milhões de pessoas em 2022 (SNIS, 2022). Embora existam ações que objetivam o acesso ao saneamento seguro nas áreas rurais, estas são pontuais se comparadas ao desenvolvimento existente no meio urbano, o que provoca disparidades no acesso ao saneamento básico às populações dessas áreas. O meio rural possui indicadores mais desfavoráveis, tanto no abastecimento de água, quanto no esgotamento sanitário, o que indica a fragilidade do arcabouço legal para mitigar as assimetrias no acesso ao saneamento básico (Penteado; Branchi, 2023; Siveira, 2013).

O artigo 48 da Lei Federal nº 11.445/2007 estabelece as diretrizes para a Política Federal do Saneamento Básico e no inciso VII trata da garantia de meios adequados para atendimento da população rural através da utilização de soluções compatíveis com as suas características econômicas e sociais peculiares. Também foi incluído como objetivo da Política “proporcionar condições adequadas de salubridade ambiental às populações rurais e às pequenas comunidades” (Brasil, 2020a).

Apesar das tratativas supracitadas, a Lei pouco aborda a temática do saneamento rural, visto que a expansão do atendimento nessas áreas tende a ser restringida em função do baixo

potencial de rentabilidade dos sistemas. A dispersão das comunidades rurais inviabiliza, na maioria dos casos, o provimento do serviço de saneamento por soluções coletivas como sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário por meio de rede geral, visto que o custo de implantação é elevado para atender a uma pequena quantidade de domicílios (Castro; Cerezini, 2022).

Um reflexo dessa realidade é apresentado no Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) (2019), que evidencia a hegemonia de soluções coletivas em aglomerados próximos de áreas urbanas e mais adensados. Entretanto, nas residências dispersas prevalece a ausência de soluções ou a predominância de formas inaceitáveis de saneamento básico, como a queima de resíduos ou fossas rudimentares. O maior grau de precariedade em áreas rurais pode contribuir negativamente com os indicadores ambientais e de saúde da população, além de indicar a necessidade de avançar em soluções apropriadas a realidades específicas para grupos em situação de maior vulnerabilidade.

Para atender as metas de universalização do saneamento estabelecidas no novo Marco Legal, é imprescindível viabilizar meios de expansão do atendimento em áreas rurais. O PNSR (2019) estabeleceu metas para um período de 20 anos, pautadas no conteúdo do marco legal existente, entretanto a universalização do acesso ainda não será alcançada no horizonte proposto, visto que existem obstáculos que dificultam os avanços na gestão do saneamento e, conseqüentemente, no atendimento a todas as demandas.

Para o abastecimento de água, foi estabelecido que, em 2038, 96% dos domicílios rurais brasileiros devem ser abastecidos por rede de distribuição de água, com canalização interna no domicílio ou na propriedade, ou por poço ou nascente, com canalização interna. A meta de esgotamento sanitário estabelece que 76% dos domicílios rurais brasileiros devem ser atendidos por rede coletora ou fossa séptica para excretas ou esgotos sanitários no mesmo ano.

Quanto à drenagem e manejo de águas pluviais, as metas de atendimento até 2038 são duas: 25% dos domicílios rurais brasileiros estejam localizados em vias com pavimento, meio fio e bocas de lobo; e 30% dos domicílios rurais brasileiros possuam dispositivos de controle do escoamento superficial. Por fim, para o manejo de resíduos sólidos, a meta estabelecida para o ano de 2038 foi de 77% dos domicílios rurais atendidos por coleta direta ou indireta (Brasil, 2019).

Segundo Castro e Cezerini (2023), para atingir as metas de atendimento, as características específicas do meio rural devem ser consideradas na elaboração das políticas públicas, a fim de proporcionar soluções com melhor custo-benefício. No abastecimento de água, por exemplo, a construção de sistemas simplificados ou soluções alternativas coletivas tendem a contribuir com a expansão do serviço e, conseqüentemente, alcançar maior contingente populacional residentes em áreas não urbanas com a distribuição de água segura.

2.2 ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM COMUNIDADES RURAIS

A prestação dos serviços de saneamento deve considerar as peculiaridades locais e regionais, já que as tecnologias e as infraestruturas de saneamento básico necessárias ao atendimento em áreas rurais podem ser diferentes das utilizadas no meio urbano. Além disso, o PNSR buscou reconhecer a ruralidade e o envolvimento da população rural no âmbito do modelo de gestão dos serviços públicos. No abastecimento de água, as modalidades do serviço podem variar de acordo com a necessidade local, disponibilidade financeira, modelo de gestão, viabilidade técnica, social e econômico-financeira (Roland *et al.*, 2019).

As modalidades de abastecimento são classificadas, na Portaria GM/MS nº 888/2021, como sistemas de abastecimento de água (SAA), 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; soluções alternativas coletivas de abastecimento (SAC), modalidade de abastecimento coletivo destinada a fornecer água potável, sem rede de distribuição; e soluções alternativas individuais (SAI), modalidade de abastecimento de água para consumo humano que atenda a domicílios residenciais com uma única família, incluindo seus agregados familiares (Brasil, 2021).

O desafio da definição dos conceitos de déficit na prestação de serviço e atendimento adequado relativos ao abastecimento de água rural envolve a insuficiência de informações e de dados disponíveis. Estes não são capazes de demonstrar aspectos relativos à qualidade da água e à regularidade de seu fornecimento, o que impede a definição precisa de áreas com o serviço universalizado. Na caracterização do acesso ao abastecimento de água em áreas rurais, o PNSR apresenta três perspectivas:

- i) O atendimento adequado: população que não sofre com intermitência ou racionamento da água, recebe água segura (de rede de distribuição ou de poços

- e nascentes) com canalização interna e/ou presente, como solução complementar, água proveniente de cisternas de captação de água de chuva;
- ii) O atendimento precário: população que recebe água fora dos padrões de potabilidade, com intermitência prolongada no fornecimento, que utiliza água de cisterna de captação de água de chuva que forneça água sem segurança sanitária e/ou que utiliza água de chafariz ou caixa abastecidos por carro pipa;
 - iii) Sem atendimento: Todas as situações não enquadradas nas definições de atendimento e que se constituem em práticas consideradas inadequadas (Brasil, 2019).

Levando em conta os setores censitários de área rural do IBGE (aglomerações próximas do urbano; aglomerações mais adensadas isoladas; aglomerações menos adensadas isoladas; e sem aglomerações, com domicílios relativamente próximos de aglomerações ou isolados), o PNSR (2019) diagnosticou que, no Brasil, 40,5% da população possui atendimento adequado, 33,5% apresentam atendimento precário e 26,0% não possui atendimento. Percebe-se ainda que a fração da população que sofre influência direta dos centros urbanos, principalmente devido à proximidade e densidade demográfica, possuem taxas maiores de soluções relacionadas às demandas coletivas, como rede de distribuição, se comparada a população mais dispersa.

Ainda segundo o PNSR (2019), a captação superficial é utilizada como captação secundária nas áreas rurais, tendo em vista a melhor qualidade das águas subterrâneas, de nascentes ou da chuva, de modo a permitir a utilização de métodos simplificados de tratamento. Em relação a canalização intradomiciliar, em 2010, 61% da população rural brasileira possuía canalização interna nos domicílios, esta impacta na qualidade da solução e redução da intermitência, bem como favorece as práticas de limpeza e higiene nos domicílios

Para solucionar a problemática do acesso à água, é preciso demandar do Estado que institua um padrão homogêneo de cidadania hídrica, onde seja garantido o direito a água canalizada e as alternativas emergenciais sejam paliativas, não utilizadas como a principal solução dos conflitos distributivos relativos à água (Cunha, 2020).

Além do investimento em infraestrutura, a garantia da segurança hídrica para o abastecimento humano em áreas rurais necessita de uma gestão eficiente, que permita conservar os mananciais, evitando a contaminação destes, o que impacta no custo de tratamento da água distribuída. A disseminação dos SAAs ou SACs deve ser acompanhada de um diagnóstico

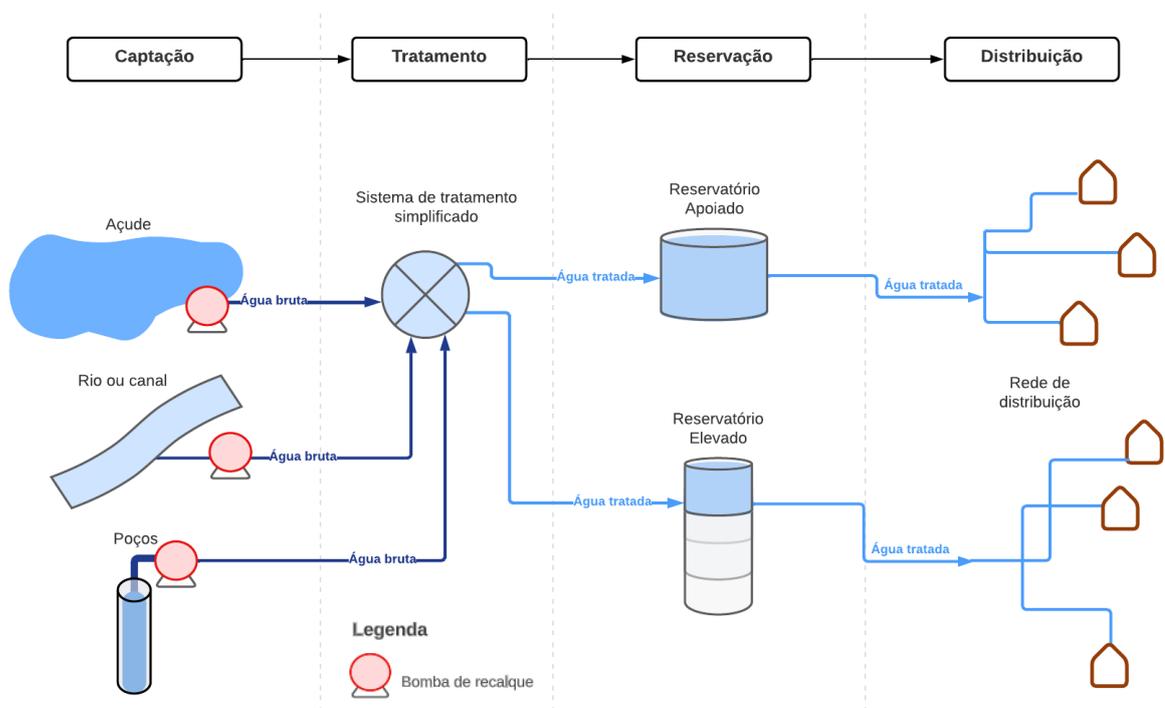
situacional da bacia hidrográfica, bem como da água disponível na localidade, para que seja realizada a proposição da modalidade que garanta o acesso à água segura. Vale ressaltar que, nos sistemas ou soluções já existentes, a identificação dos problemas pode subsidiar a tomada de decisão dos gestores do abastecimento (ANA, 2022).

2.2.1 Sistemas de abastecimento de água em áreas rurais

Uma perspectiva de atendimento das demandas em áreas rurais é a construção de sistemas de abastecimento de água simplificados, idealizados para reduzir os custos de instalação e facilitar a operação e manutenção, em áreas onde os sistemas convencionais são inviáveis. Estes são projetados com o objetivo de incluir poucos componentes e pequenas extensões de adução, utilizando fontes de água locais como poços rasos, nascentes ou açudes (Brasil, 2020b; Santana Jr; Pedreiro, 2023).

A Figura 1 apresenta um croqui com os elementos de um SAA simplificado, que são: fonte de captação, estação de bombeamento, adutora, sistemas de tratamento simplificado (simples desinfecção, geralmente), reservatório, que pode ser elevado ou apoiado, e rede de distribuição.

Figura 1 – Sistema simplificado de abastecimento de água



Fonte: Autoria própria (2024).

As estruturas de captação utilizadas em SAAs simplificados são similares às do SAAs, mas possuem menores dimensões, visto que a quantidade de usuários e a demanda do abastecimento de água em comunidades rurais é inferior às áreas urbanas. Apesar da simplicidade do tratamento de água utilizadas nos sistemas simplificados, estes podem atuar de maneira efetiva no controle bacteriológico através da desinfecção, tratamento geralmente utilizado em captação subterrânea (Marmo; Silva, 2021).

Entretanto, quando a captação é realizada em corpos superficiais, a depender das características físico-químicas e organolépticas da água, podem ser adicionadas outras etapas do tratamento convencional ao simplificado, como a filtração, decantação, pré-cloração, entre outras, que necessitam ações específicas de operação (Ribeiro *et al.*, 2019). Quando da ausência de capacitação para os operadores locais, o uso de SAAs simplificados pode estar associado a problemas de operação e manutenção.

Em sistemas de abastecimento de água em áreas rurais, é necessária constante verificação das tubulações da rede de distribuição, a fim de se evitar as perdas de água. Geralmente, as perdas podem ocorrer devido à falta de manutenção adequada da rede, as tubulações expostas em áreas de tráfego de veículos, aos roubos de água pelos usuários ou pela negligência por parte dos moradores. Com relação à etapa de reservação da água, as principais recomendações relacionam-se com as possibilidades de contaminação da água, devido à ausência de uma rotina de limpeza adequada e de fiscalização da integridade dos reservatórios (Brasil, 2020b).

2.2.2 Soluções alternativas coletivas e suas infraestruturas

Assim como os SAAs simplificados, as SACs também utilizam fontes de água locais, o que reduz os custos com adução da água bruta. A Figura 2 apresenta exemplos de soluções alternativas coletivas e seus equipamentos, como cisternas coletivas, chafariz, dessalinizador e poço manual.

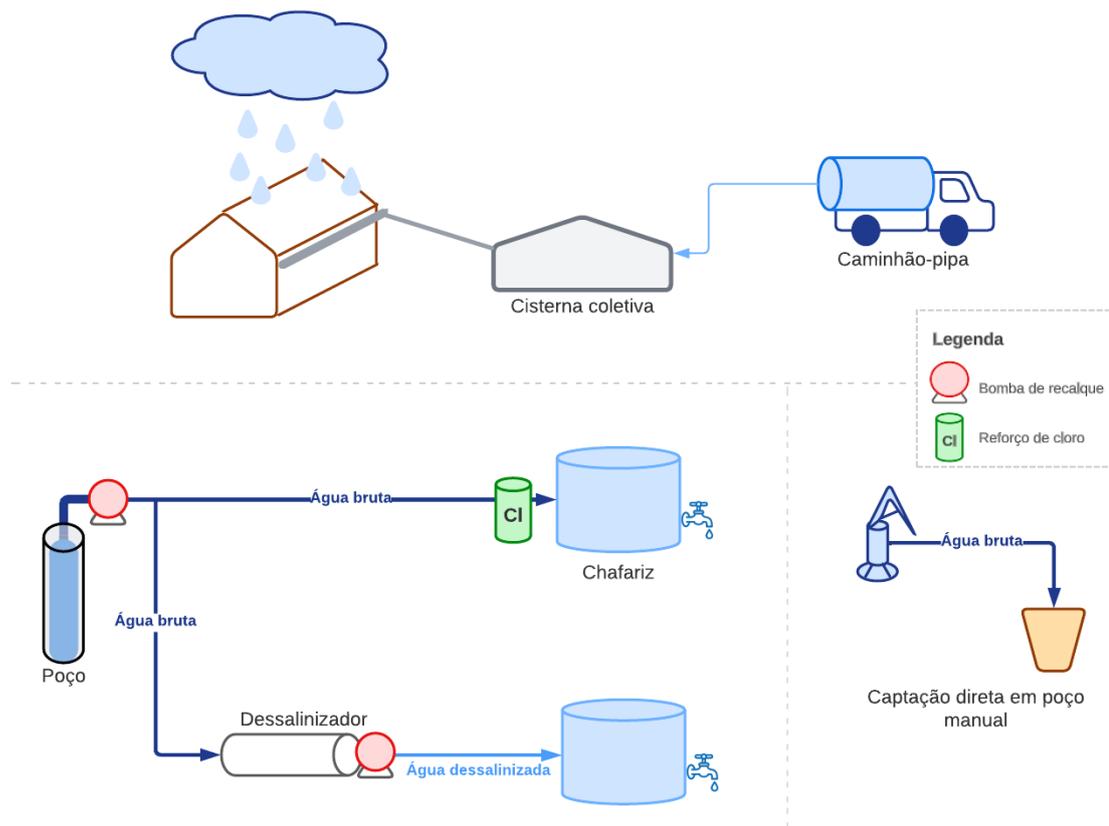
As SACs, geralmente, possuem poço ou água de chuva como fonte de captação, podem conter sistema simplificado de tratamento ou sistemas de dessalinização, e, ainda, reservatório de armazenamento, chafariz de distribuição ou captação direta. Vale ressaltar que, no semiárido brasileiro, o abastecimento de cisternas coletivas pode ser feito por caminhões-pipa, no período de estiagem (Brasil, 2017).

Embora não possua rede de distribuição, a disseminação de SACs, no Brasil, contribuiu

na redução de problemas relacionados ao abastecimento de água para populações de áreas difusas. O uso compartilhado da água proporciona a cooperação e o fortalecimento das comunidades para atuarem na gestão e manutenção das soluções coletivas e facilita o acesso àqueles que necessitavam de grandes deslocamentos para captar a água (Mayer, 2022).

Entretanto, as soluções alternativas coletivas estão mais suscetíveis à contaminação da água se comparado aos SAAs simplificados, visto que há uma menor regularidade de manutenções, bem como maior exposição às práticas inadequadas de higiene pela população, principalmente no manuseio e armazenamento doméstico (Agnolin *et al.*, 2022). Desse modo, Barros *et al.* (2021) reforçam a necessidade de monitoramento periódico para vigilância e controle da qualidade da água para estas soluções, para avaliação de ajustes necessários ao tratamento, bem como conscientização da população quanto às boas práticas de utilização.

Figura 2 – Exemplos de soluções alternativas coletivas de abastecimento de água



Fonte: Autoria própria (2024).

2.2.3 Qualidade da água em comunidades rurais

A potabilidade da água é um fator determinante na qualidade de vida e saúde da população, pois, se não tratada, esta é capaz de transmitir agentes patogênicos e substâncias nocivas aos usuários. A qualidade da água demanda atenção por parte dos gestores e do poder

público e pode ser verificada a partir da análise de parâmetros microbiológicos (coliformes totais e *Escherichia coli*), físico-químicos (cloro residual livre, turbidez, cor aparente, pH, sólidos totais dissolvidos), organolépticos e outros que possam afetar a saúde da população. A avaliação desses parâmetros deve ser realizada como forma de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano, de modo a manter a água em conformidade com os padrões de potabilidade, desde a captação até o tratamento e distribuição de água (Mayer, 2022).

O controle de qualidade da água nos SAA ou SAC diz respeito às ações realizadas pelo responsável e destinadas a verificar se a água distribuída à população é potável subsidiando a escolha do tratamento adequado, a partir de um plano de amostragem para análises laboratoriais. Quando forem detectadas amostras com resultados que divergem do padrão de potabilidade estabelecido por Lei, ações corretivas devem ser tomadas, até que novas amostras coletadas em dias sucessivos revelem resultados satisfatórios.

Já a vigilância é realizada pelas autoridades de saúde pública para avaliar se a água distribuída oferece risco à saúde da população, por meio do monitoramento contínuo dos dados fornecidos pelo responsável pelo abastecimento, além da investigação de surtos de doenças transmitidas pela água (Bárta *et al.*; 2021; Oliveira Jr *et al.*; 2019). No Brasil, os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade são definidos pelo anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017 (PRC nº5/2017), alterada pelas Portarias GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, e nº 2472, de 28 de setembro de 2021.

O Art. 24 do anexo supracitado indica que toda água para consumo humano, de distribuição coletiva, deverá passar por processo de desinfecção e que as águas provenientes de mananciais superficiais devem ser submetidas, no mínimo, a filtração, antes da desinfecção. Entretanto, em 2019, sete milhões de brasileiros consumiam água sem o tratamento mínimo exigido na Portaria de Potabilidade. Salienta-se que, desses, aproximadamente 42% são da região Nordeste e 38% na região Norte, o que indica desigualdades regionais no acesso à água segura (Brasil, 2020a).

Apesar de normativamente, o processo de vigilância já está consolidado no Brasil, na prática, ainda existem lacunas e desafios, principalmente no contexto rural. A dispersão geográfica e dificuldade de acesso à essas áreas, como também a falta de recursos financeiros e a escassez da mão de obra qualificada, dificulta a realização de um plano de amostragem

condizente com o previsto na Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano. Fortes, Barrocas e Kligerman (2019) concluem que, além das fragilidades relacionadas ao monitoramento, as ações de informação, especialmente no campo da comunicação e mobilização social, não são priorizadas e podem dificultar a efetiva busca e defesa do acesso à água potável.

Ademais, na abordagem da vigilância da qualidade da água para consumo humano, apesar de constituir atividade fundamental, o monitoramento é insuficiente como instrumento de avaliação de riscos, uma vez que os critérios de amostragem são baseados em princípios estatísticos/probabilísticos, incorporando, inevitavelmente, uma margem de incerteza. Salienta-se que o monitoramento reflete as características da água em uma condição passada, demandando a necessidade de rápida ação resposta para o reestabelecimento da qualidade da água. Assim, em paralelo ao monitoramento, é importante selecionar e aplicar ações corretivas para conter os riscos à saúde, quando identificadas desconformidades (Brasil, 2016).

As ações de vigilância da qualidade da água para consumo humano nas áreas rurais, incluindo comunidades tradicionais, aglomerados subnormais e grupos vulneráveis, são de responsabilidade das secretarias de saúde municipais, bem como a atualização dos dados no Sistema de Informação da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua). Apesar disso, poucas ações são realizadas nas áreas rurais, o que pode interferir na qualidade da água distribuída para a população (Brasil, 2021). No ano de 2022, foram analisadas 73.949 amostras em zonas rurais que representam cerca de 12,7% do total de amostras cadastradas no Sisagua para o Brasil, destas apenas 38,5% estavam em conformidade com o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria (Brasil, 2023).

A qualidade da água em comunidades rurais pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a fonte de captação, a contaminação da água, a infraestrutura de tratamento e a gestão dos recursos hídricos. Os poluentes que afetam a qualidade da água podem ser naturais, como minerais dissolvidos, bem como poluentes introduzidos pela atividade humana, como esgoto não tratado, produtos químicos agrícolas e resíduos industriais. Atividades de agricultura e pecuária estão fortemente presentes em áreas rurais e podem contribuir para a contaminação da água por nutrientes, pesticidas, bactérias e outros poluentes. Vale ressaltar que, práticas inadequadas de saneamento, como fossas rudimentares e ausência de coleta de resíduos também podem contribuir com a contaminação das águas superficiais e subterrâneas (Basso; Siqueira; Richards, 2021).

Além das análises microbiológicas, o Ministério de Saúde buscou, por meio das Diretrizes Nacionais para a Vigilância em Saúde de Populações Expostas a Agrotóxicos (2017) e das alterações na PRC nº5/2017, definir e implementar ações voltadas ao monitoramento de agrotóxicos presentes na água distribuída, principalmente em ambientes rurais. A exposição humana a estes tipos de substâncias representa um problema de saúde pública, podendo ocorrer intoxicações agudas ou crônicas após exposição prolongada. Essas mudanças visam atender a meta de melhoria da qualidade das águas, estabelecida nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (Souza Jr, 2021).

No rural do semiárido brasileiro, a baixa qualidade da água disponível associada à forte presença de cisternas de água de chuva, instaladas por programas governamentais, leva à composição de múltiplas fontes e à hierarquização do uso da água pelos usuários, que contribuem para a utilização de água não segura pela população. A necessidade de suprir o déficit de distribuição de água potável em áreas rurais também contribui para a busca de alternativas às formas tradicionais de gestão, pois influenciam diretamente na efetividade do tratamento e na redução da intermitência dos SAAs ou SACs (Roland *et al.*, 2019).

2.2.4 *Gestão compartilhada em sistemas rurais de abastecimento de água*

A instituição das Companhias Estaduais de Saneamento Básico (Cesbs), em 1971, destinou recursos para a ampliação da cobertura dos serviços de água e esgoto, principalmente nas áreas urbanas. Inicialmente, os municípios que estavam desestruturados administrativamente ou que apresentaram déficit financeiro concederam a prestação dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário as Cesbs. Com a consolidação das Companhias, a maioria dos municípios, independente da estruturação, estabeleceram contratos de concessão dos serviços. Entretanto, as Companhias geriam os serviços de saneamento apenas nas áreas urbanas muito adensadas e o poder público municipal já não recebia mais subsídios e recursos públicos do governo federal para este tipo de serviço, acarretando a precarização destes em áreas difusas (Santos; Nogueira; Oliveira, 2012).

A ausência de atendimento em áreas rurais proporcionou atrasos na universalização dos serviços de abastecimento de água, o que incentivou os gestores públicos na busca de alternativas para gestão do serviço nessas localidades. Raid *et al.* (2022) avaliaram os contextos rurais através do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e identificaram que os modelos de prestação de serviços de abastecimento de água mais adequados para ambientes rurais foram a gestão municipal e a gestão compartilhada. A segunda possui como benefícios o

empoderamento comunitário e fortalecimento das associações, aumento da vida útil dos sistemas, a ampliação do atendimento, a cobrança mais adequada à realidade financeira local, entre outros (Freitas *et al.*, 2015).

A meta 6.b do ODS 6 também trata do apoio e fortalecimento da participação das comunidades locais, para melhorar a gestão da água e do saneamento. O envolvimento dos usuários, por meio das associações comunitárias, proporciona maior integração com os gestores, os tornando atores intervenientes no planejamento do abastecimento de água com o intuito de fortalecer o caráter democrático e promover o controle social. Entretanto, na gestão comunitária pode existir limitações no acesso a água segura, uma vez que são utilizadas técnicas de tratamento simplificadas, devido à baixa arrecadação do sistema. E, ainda, estão mais propensos a operar o tratamento de forma intermitente e apresentar falhas com maior frequência (Ferreira *et al.*, 2019).

Em vista disso, os planos de segurança da água podem contribuir de forma significativa no levantamento e priorização dos eventos que prejudiquem o fornecimento de água potável, a partir da avaliação de risco. Além de subsidiar os gestores em ações preventivas e corretivas, de modo a reduzir as limitações da qualidade e disponibilidade de água em comunidades rurais atendidas por sistemas simplificados com gestão compartilhada.

Com o intuito de assegurar que os sistemas de abastecimento das comunidades rurais tenham sustentabilidade e vida útil prolongada, o Sistema Integrado de Saneamento Rural (SISAR) surgiu como alternativa institucional, social, técnica e financeira para promover o saneamento básico à população rural por meio da gestão compartilhada. Além disso, o SISAR pode garantir o desenvolvimento e manutenção dos SAA simplificados, em parceria com as associações comunitárias, de modo a mitigar a centralização dos serviços e incentivar a autogestão por parte da população local. O SISAR atende núcleos populacionais rurais que contenham a partir de 50 famílias e tenham sido contemplados com a construção de SAA simplificados financiados por programas dos governos estaduais ou municipais (Camargo, 2022).

Alves e Araújo (2016) analisaram os impactos da implementação do SISAR no distrito rural de Cristais, Cascavel/CE e concluíram que este auxiliou na melhoria da qualidade e do acesso à água na localidade, reduzindo a intermitência na distribuição. A maior disponibilidade de água também demonstrou mudanças nos hábitos de higiene da população, bem como

melhoria nos indicadores de saúde da localidade. Salienta-se que as maiores dificuldades encontradas dizem respeito às questões culturais que contribuem para uma resistência tanto na utilização de água tratada devido às suas características organolépticas quanto nas cobranças tarifárias do serviço.

2.3 PLANOS DE SEGURANÇA DA ÁGUA

O Plano de Segurança da Água (PSA) compõe-se de um processo sistemático de avaliação dos SAAs e SACs que, segundo a Organização Mundial da Saúde (2023a), possui o formato mais confiável para gerir o abastecimento de água potável, com o intuito de garantir a proteção da saúde pública e fornecimento de água segura à população. Este é uma ferramenta de gestão complementar aos planos de saneamento básico, que auxilia os responsáveis nas tomadas de decisão ao longo de todas as etapas do abastecimento de água.

O anexo XX da PRC N°5/2017 indica, em seu artigo 49°, que “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 OMS ou definidos em diretrizes do Ministério da Saúde, para fins de gestão preventiva de risco à saúde”.

No Brasil, o PSA não é ainda um instrumento obrigatório para os sistemas e soluções alternativas de abastecimento de água, estando sob responsabilidade das autoridades de saúde pública, locais, regionais e nacionais, a cobrança para implementação destes. Entretanto, uma vez elaborado e implementado no SAA ou SAC, o PSA pode facultar os responsáveis pelo abastecimento de água do cumprimento da frequência mínima de amostragem para vigilância da qualidade da água para consumo humano e da alteração dos parâmetros monitorados (Brasil, 2021).

Apesar de não ser obrigatório, a importância da elaboração e implantação de PSAs é justificada pelo reconhecimento das limitações da abordagem tradicional do controle da qualidade da água para consumo humano. Estes métodos, focados em análises laboratoriais, são, em sua maioria, demorados e com baixa capacidade de alerta rápido à população, em casos de contaminação da água, não garantido a efetiva segurança da água (Ventura; Filho; Nascimento, 2019).

Assim, o PSA se demonstra instrumento preventivo e corretivo que visa a preservação e universalização deste recurso, em quantidade e qualidade, a partir da identificação de perigos,

gestão de riscos e estabelecimento de medidas de controle a curto, médio e longo prazos, de acordo com as particularidades específicas de cada localidade (Brasil, 2012).

2.3.1 Implantação dos planos de segurança da água

A OMS introduziu o conceito de PSA em 1976, por meio de inspeções sanitárias que objetivavam orientar ações corretivas e permitir a priorização de reparos nos SAAs ou SACs para melhoria da segurança da água fornecida para consumo humano. Esse processo se deu por meio da introdução da gestão de risco nas avaliações do abastecimento de água, que pudessem contribuir com o desenvolvimento de metodologia que garanta a avaliação precisa da água distribuída para a população (Setty; Ferrero, 2021; Kelly *et al.*, 2020).

Com a consolidação da metodologia do PSA, até 2021, 65 países possuíam instrumentos políticos que promovem ou exigem a implementação de PSA, utilizando abordagens baseadas na gestão de riscos. Há, ainda, outros países com a política em desenvolvimento, o que demonstra a importância dos PSAs para a manutenção da qualidade da água e promoção de saúde pública em escala global (WHO, 2023b). Para implementação efetiva dos PSAs, String e Lantagne (2016) reforçam a importância de adaptação do estudo à realidade local, bem como o envolvimento da população no desenvolvimento do plano, uma vez que a abordagem adotada pode afetar diretamente nos resultados do PSA e no potencial para melhoria da qualidade da água.

Kumpel *et al.* (2018) avaliaram os impactos da implementação dos planos de segurança da água na região da Ásia e do Pacífico, indicando que 83% dos 99 sistemas de abastecimento avaliados obtiveram melhorias na infraestrutura como resultado direto da implementação, geralmente relacionados à qualidade da água. Esta implementação aumentou a quantidade de testes de parâmetros da qualidade da água, bem como a efetividade do acompanhamento das reclamações dos consumidores. Vale ressaltar que a maior dificuldade da implementação de medidas de controle para mitigação de riscos se deu devido às restrições financeiras, além disso a diversidade nos tipos de sistema e tempo de elaboração do PSA resulta em heterogeneidades nos resultados alcançados.

Em Gana, a implementação do PSA destaca-se, principalmente, pela abrangência nas zonas rurais que possuem 117 planos elaborados, envolvendo a participação de profissionais da saúde, da gestão municipal e das associações comunitárias. Entretanto, as exigências semelhantes aos sistemas urbanos para sistemas de abastecimento de água simplificados, pode

acarretar dificuldades de implementação destes, devido à ausência de monitoramento da qualidade de água, dos tipos de SAA existentes, bem como ausência de recursos humanos e financeiros nas localidades (REAL-Water, 2023).

A disseminação da metodologia de PSA no Brasil, apesar de previsto na Portaria de Potabilidade como instrumento de avaliação e benfeitorias do abastecimento de água, ainda é incipiente, devido a não obrigatoriedade de implementação, principalmente em áreas rurais. O Ministério da Saúde fomenta a elaboração de PSA por meio de Termos de Execução Descentralizada (TED) com as Universidades Federais, que disponibilizam corpo técnico qualificado para, em parceria com os responsáveis pelo abastecimento da área estabelecida em contrato, inspecionarem os SAAs e SACs, realizarem a identificação e avaliação de riscos e proposição de medidas de controle (Brasil, 2021; 2017).

O levantamento da Associação Internacional de Água, em parceria com a OMS, identificou que foram desenvolvidos e implementados mais de 10 planos no Brasil até 2017, considerando os sistemas urbanos e rurais (WHO/IWA, 2017). Levando em consideração que, segundo o SNIS (2022), o País possui 5.337 municípios com sistema público de água, a quantidade de PSAs desenvolvidos é expressivamente baixa, demonstrando a necessidade de disseminação da importância dessa metodologia para a distribuição de água segura de maneira mais efetiva.

No que tange às áreas rurais, os sistemas ou soluções alternativas de abastecimento de água são ainda mais descentralizados, devido à dispersão dos aglomerados populacionais, o que resulta em uma quantidade maior de sistemas simplificados instalados, além de dificultar a implementação de PSA. Corrêa e Ventura (2020) realizaram análise de riscos para implementação de PSAs em cinco localidades rurais do município de São Carlos/SP e constataram que a identificação de eventos perigosos exigiu tempo elevado, visto que foi necessário a elaboração de banco de dados e adaptação dos itens encontrados na literatura.

Tendo em vista as dificuldades enfrentadas para implementação de PSA em comunidades rurais, se faz necessário adaptação da metodologia sugerida pela OMS, uma vez que as ferramentas disponíveis para identificação dos eventos perigosos e definição do grau de risco podem mascarar o potencial danoso destes à saúde pública e bem-estar da população nestas áreas (Corrêa; Venura, 2021).

Além disso, as comunidades carecem de investimentos, infraestrutura, medidas socioeducativas e integração com o espaço urbano, o que afeta a elaboração do PSA, bem como sua eficácia, eficiência e efetividade. A partilha de conhecimento por meio do envolvimento da comunidade, contribui com a aceitação do PSA e promove a integração do PSA com as áreas correlatas (Fagundes, 2022; Herschan *et al.*, 2020).

Vale ressaltar que o PNSR (2019) fomenta a elaboração de PSAs em comunidades rurais como estratégia para a efetivação do controle e vigilância da qualidade da água em sistemas simplificados e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água. O PSA em áreas rurais, se adaptado à realidade local, pode contribuir com a melhoria da qualidade da água, a confiabilidade e a sustentabilidade do abastecimento de água, e auxiliar a atingir a meta do PNSR de 96% de domicílios rurais atendidos por rede de distribuição com água potável até 2038.

2.3.2 Metodologia de elaboração de planos de segurança da água

Os Planos de Segurança da Água, tanto para áreas urbanas como para as rurais, são compostos das fases de desenvolvimento, operação, verificação e revisão, que atuam de forma cíclica, a fim de manter a continuidade e eficácia de sua implementação. A OMS sugere que os PSAs sejam realizados a partir da elaboração de dez produtos que abrangem desde a composição da equipe técnica até a revisão e atualização do PSA, conforme apresentado no Quadro 1 (WHO, 2023a).

Quadro 1 – Etapas de elaboração de planos de segurança da água

Etapa de elaboração	Descrição
Módulo 1 – Equipe do PSA	A equipe do PSA é um grupo multidisciplinar que deve compreender o funcionamento do sistema de abastecimento de água em todas as etapas, desde a captação até a distribuição à população. Deve garantir que a abordagem seja compreendida por todas as partes interessadas e atuar na identificação dos problemas e promoção das melhorias para o SAA.
Módulo 2 – Descrição do sistema de abastecimento de água	Esse módulo deve apresentar uma descrição precisa de todo o abastecimento de água da área em estudo, a partir da documentação e atualização de informações, bem como análises laboratoriais, visitas em campo e entrevistas. Além disso, deve prover um histórico dos problemas de qualidade e disponibilidade da água.
Módulo 3 – Identificação de perigos e eventos perigosos	A identificação dos perigos e eventos perigosos busca compreender o quê, onde e como um evento pode afetar negativamente a distribuição de água segura para população em cada uma das etapas do abastecimento de água.
Módulo 4 – Validação de Medidas de controle e avaliação dos riscos	A avaliação de risco visa determinar os níveis de riscos para todos os eventos perigosos identificados, para que os riscos mais graves sejam priorizados para tomadas de decisão pelos gestores. Já a validação da eficácia das medidas de controle existentes pode contribuir com a indicação de mudanças para reduzir os níveis de riscos existentes.

Quadro 1 – Etapas de elaboração de planos de segurança da água (continuação)

Etapa de elaboração	Descrição
Módulo 5 – Planejamento de Melhorias	Tem o objetivo de desenvolver e implementar um plano de melhorias progressivas que possam garantir que os níveis de risco sejam reduzidos a níveis aceitáveis.
Módulo 6 – Monitoramento das medidas de controle	Definir e implementar um plano de monitoramento operacional que determine se as medidas de controle estão funcionando como pretendido, dentro dos limites aceitáveis e garantir que ações corretivas sejam tomadas quando os limites predefinidos não forem cumpridos.
Módulo 5 – Planejamento de Melhorias	Tem o objetivo de desenvolver e implementar um plano de melhorias progressivas que possam garantir que os níveis de risco sejam reduzidos a níveis aceitáveis.
Módulo 6 – Monitoramento das medidas de controle	Definir e implementar um plano de monitoramento operacional que determine se as medidas de controle estão funcionando como pretendido, dentro dos limites aceitáveis e garantir que ações corretivas sejam tomadas quando os limites predefinidos não forem cumpridos.
Módulo 7 – Verificação da eficácia do PSA	Para verificar se o PSA como um todo está funcionando de maneira eficaz, atendendo os limites estabelecidos de qualidade de água, a satisfação dos usuários e se o PSA está adequadamente implementado.
Módulo 8 – Fortalecimento dos procedimentos de gestão	Prover documentação com procedimentos a seguir durante as condições normais, de incidentes ou em situações emergenciais, a partir de procedimentos operacionais padrões (POP) ou planos de respostas a emergência (PRE).
Módulo 9 – Fortalecimento dos programas de apoio do PSA	Estabelecer programas de apoio que possam dar suporte à implementação efetiva do PSA com atividades de apoio organizacional, bem como programas direcionados a riscos específicos.
Módulo 10 – Revisão e atualização do PSA	As revisões do PSA devem ser feitas periodicamente a partir das experiências operacionais para que, caso necessário, estes serem atualizados após incidentes, quase acidentes ou emergências.

Fonte: Adaptado de Brasil (2012) e WHO (2023a).

Na fase do desenvolvimento ocorre a identificação e classificação de eventos perigosos presentes nos sistemas de abastecimento que possam afetar adversamente o fornecimento de água potável e segura para a população, a fim de classificá-los e geri-los eficazmente, de modo a reduzir os riscos associados a estes.

A Norma Brasileira ABNT NBR 17080 (2023), que apresenta os princípios e diretrizes para elaboração e implementação de planos de segurança da água, indica que os perigos e eventos perigosos podem estar associados a condições ou fatores naturais, bem como a condições antrópicas. Os perigos são os agentes químicos, físicos, microbiológicos, radioativos e de quantidade que podem causar danos à saúde pública. Os eventos perigosos são os incidentes que podem levar a presença de um perigo. O risco, por sua vez, relaciona a probabilidade de ocorrência de um evento perigoso às suas consequências nocivas à saúde pública.

A avaliação de risco realizada no PSA pode contribuir para tomadas de decisão, a partir da priorização e do desenvolvimento de estratégias de mitigação dos riscos e continuidade das

melhorias propostas. Entretanto, Roger e Tavares (2018) concluíram que, associados à implementação da metodologia de avaliação de risco, existem desafios tanto na perspectiva técnica e operacional, quanto nos termos de governança. Um deles diz respeito a imprecisão associada às respostas dos especialistas, que pode afetar a qualidade das decisões no PSA, reduzindo a eficiência das medidas de controle escolhidas.

2.4 AVALIAÇÃO DE RISCO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O gerenciamento de um sistema de abastecimento de água efetiva suas ações baseadas principalmente na prática do monitoramento laboratorial como forma de verificação da qualidade da água distribuída. Entretanto, mesmo buscando a conformidade com a legislação de potabilidade vigente, resumir a avaliação do sistema à apenas esta prática, torna-a onerosa e ineficaz.

E, ainda, traz consigo uma série de inconvenientes que não garantem a qualidade da água distribuída à população, como a dificuldade em realizar análises mais complexas para detecção de algumas situações indesejáveis, ao longo de todo o sistema; e a quantidade e frequência insignificante das amostras coletadas, não garantindo avaliação da qualidade da água nos aspectos temporal e espacial (Mancuso; Souza, 2015).

Salienta-se que a segurança da água no contexto rural inclui o acompanhamento das condições sanitárias e ambientais das comunidades, suas problemáticas e medidas para mitigá-las, o que pode ser alcançado pela identificação de riscos e priorização daqueles mais impactantes para saúde pública (Corrêa; Ventura, 2021).

Assim, a OMS (2021) afirma que a análise de risco na elaboração dos PSAs busca avaliação precisa do sistema de abastecimento de água estudado, a fim de se adequar a cada realidade a depender de fatores como o tipo de abastecimento, clima, distância do manancial, forma de tratamento, entre outros. Essa adequação deve garantir o tratamento e fornecimento de água conforme o previsto nos padrões de potabilidade estabelecidos no Anexo XX da PRC n° 5/2017.

A utilização de avaliações semiquantitativas de risco, que associam a probabilidade de ocorrência do evento perigoso avaliado à severidade das consequências deste para a saúde pública, são utilizadas com frequência na elaboração de PSAs, a fim de priorizar os eventos perigosos por meio de uma escala de risco conhecida para que seja possível orientar as decisões dos gestores de forma priorizada (WHO, 2023a). Naseri *et al.* (2022) realizaram a avaliação de

risco no PSA da cidade de Khorramshahr, no Irã, baseada no FMEA que, além da ocorrência e severidade, incorpora as formas de detecção na avaliação dos modos de falha do sistema de abastecimento.

Haider *et al.* (2021) utilizaram Fuzzy-FMEA na avaliação de risco de sistemas de abastecimento de água em regiões áridas, de modo a oportunizar a modelagem da incerteza e da imprecisão associadas às respostas dos especialistas, obtendo uma abordagem mais robusta e transparente na priorização dos modos de falha. Salienta-se que, como o FMEA apresenta flexibilidade nas avaliações de risco, não há uma padronização obrigatória do método, o propositor pode definir o *layout* dos formulários de avaliação, como também os aspectos a serem considerados como variáveis e índices de classificação, escalas numéricas, entre outros (Lucena, 2018).

2.5 FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS

A *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) é uma ferramenta utilizada na identificação, avaliação e mitigação de riscos associados a produtos, processos, sistemas ou projetos. Amplamente utilizada na indústria e na engenharia, a FMEA visa melhorar a confiabilidade, a segurança e a qualidade dos serviços prestados, além de reduzir custos associados às falhas (Dalosto, 2015).

A Norma Internacional IEC 60812 (2018) define os modos de falhas como maneiras pelas quais um sistema pode falhar, estes podem estar associados à efeitos adversos à segurança e à qualidade do serviço prestado, de maneira análoga aos eventos perigosos apresentados no PSA. Ainda segundo a Norma, a FMEA é aplicável em qualquer sistema, que envolva *software*, *hardware*, processos, incluindo a ação humana, além de avaliação da combinação destes. Há, ainda, a possibilidade de adaptação e melhoria da metodologia, a depender do objetivo do estudo.

A análise engloba as etapas de identificação dos modos de falha presentes e possíveis, bem como a avaliação de efeitos para cada modo de falha identificado. A classificação dos modos de falha é realizada em termos de severidade, que avalia o grau de impacto do modo de falha; ocorrência, indicando a frequência com que a falha pode ocorrer; e detecção, que verifica a capacidade de detectar a falha antes que ela afete o desempenho do sistema em análise (AIAG, 2008).

O produto das classificações para cada modo de falha gera o número de priorização de risco (RPN), que avalia o potencial danoso de cada um destes para o sistema, além de auxiliar na priorização de ações para reduzir ou eliminar as falhas. Entretanto, a classificação final pode estar associada a uma avaliação imprecisa, devido a carência de conexão da análise à realidade prática, com atenção voltada à construção de modelos teóricos, bem como a subjetividade associada a opinião de especialistas (Wu; Liu; Nie, 2021).

Subriadi e Najwa (2020) verificaram que a FMEA tradicional pode produzir valores inconsistentes e que essa fraqueza pode ser minimizada. Uma das principais fontes de imprecisão do resultado está relacionada à falta de dados suficientes. Em muitos casos, os especialistas precisam fazer estimativas com base em informações limitadas, o que pode resultar em incerteza significativa. Além disso, a complexidade dos sistemas avaliados pode incorporar a imprecisão, pois a previsão do comportamento destes depende da sensibilidade e compreensão de funcionamento do avaliador.

A variabilidade na percepção entre especialistas também é uma fonte de imprecisão. Cada especialista pode ter experiências e perspectivas diferentes, levando a estimativas divergentes. Essas diferenças podem decorrer de diferenças de formação, experiência prática e da personalidade. Vale salientar que a imprecisão pode ser agravada pela presença de vieses cognitivos, os especialistas podem ser influenciados por otimismo excessivo ou pessimismo, que distorcem suas respostas e levam a estimativas imprecisas (Laurenti *et al.*, 2012; Cavaignac; Forte, 2018).

Para lidar com as incertezas e imprecisão associada às respostas de especialistas, várias abordagens e técnicas podem ser aplicadas. A elicitação de especialistas, por exemplo, é uma técnica na qual os especialistas são consultados de maneira estruturada, com perguntas bem formuladas e procedimentos que ajudam a reduzir o viés e a incerteza. A análise de sensibilidade é usada para avaliar como diferentes respostas de especialistas afetam os resultados da avaliação de risco. A modelagem estatística também pode ser utilizada para lidar com a incerteza nos dados e nas respostas dos especialistas (Nassar, 2012).

A integração da FMEA com a teoria dos conjuntos *Fuzzy* resolve efetivamente as incertezas associadas a dados limitados e, ainda, a imprecisão na opinião de especialistas para análise de riscos que envolva a subjetividade. Essa abordagem integrada proporciona aos

tomadores de decisão a possibilidade de alocar os recursos de forma eficaz e minimizar as possibilidades de erro na avaliação (Haider *et al.*, 2021).

Devido a diferente experiência de cada especialista e dificuldade de visão consensual na avaliação de riscos, Razee *et al.* (2020) propuseram uma abordagem híbrida para o FMEA, a partir do sistema de inferência *Fuzzy* (SIF), a fim de priorizar os riscos potenciais em relação aos diferentes pesos de cada fator de risco. Os resultados obtidos mostraram que a priorização dos riscos com base na pontuação apresentada, além de considerar a incerteza e atribuir pesos diferentes aos fatores de severidade, ocorrência e detecção, criou uma distinção completa entre riscos classificados com mesma pontuação na FMEA tradicional.

2.6 TEORIA DOS CONJUNTOS *FUZZY*

A lógica *fuzzy* é um ramo da matemática que lida com a representação e manipulação de informações que não são estritamente binárias, ou seja, que não são apenas verdadeiras ou falsas. Em vez disso, ela permite a modelagem de sistemas de elementos que as fronteiras são incertas, onde os elementos não pertencem apenas a um conjunto, como em conjuntos clássicos, mas podem pertencer parcialmente (Bede, 2013; Mittal *et al.*, 2020).

Zadeh (1965) introduziu a metodologia como uma maneira de modelar a imprecisão e a incerteza que frequentemente são encontradas em problemas do mundo real. A principal vantagem da metodologia é sua capacidade de modelar e lidar com informações imprecisas e incertas, a partir da modelagem sistemas complexos com regras difusas, de modo a tomar decisões sob incerteza de maneira mais realista e adaptável (Zimmermann, 2010). Isso a torna uma ferramenta aplicável a situações nas quais a clareza absoluta não é possível ou desejável, como na avaliação de riscos dos Planos de Segurança da Água, que apresenta subjetividade na avaliação dos especialistas.

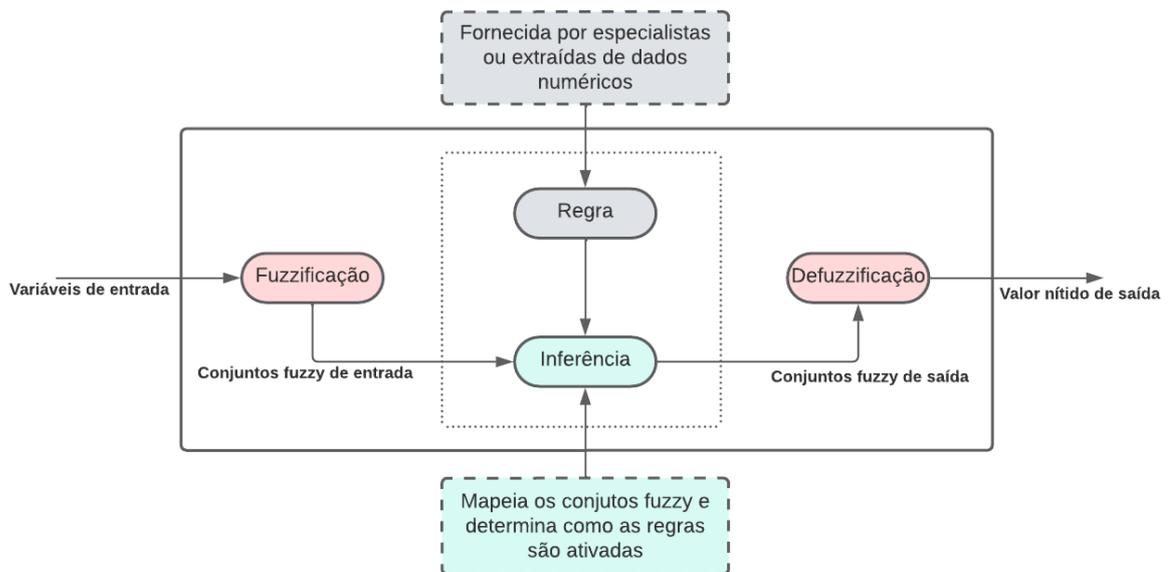
A representação de um conjunto *fuzzy* envolve o uso de uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0,0, 1.0]$ que atribui a cada elemento do universo de discurso um valor entre 0 e 1, indicando o grau de pertinência a esse conjunto, onde $\mu_A(x) = 0$ indica a não pertinência total e $\mu_A(x) = 1$ indica a pertinência total. Essas funções de pertinência podem assumir várias formas, incluindo funções triangulares, trapezoidais, sigmoidais e outras, dependendo do contexto da aplicação (Ross, 2010).

Uma variável linguística, nos conjuntos *fuzzy*, pode assumir valores de pertinência (graus de pertinência) em diferentes conjuntos *fuzzy* em vez de valores discretos ou numéricos. Estas são representadas por meio de conjuntos *fuzzy*, onde cada conjunto descreve um conjunto de valores que compartilham uma característica comum. Elas são utilizadas na base de regras de sistemas de inferência *fuzzy*, para modelar o comportamento de sistemas complexos, reduzindo a incerteza, ambiguidade e subjetividade nas informações (Senapati; Yager, 2020).

2.6.1 Sistema de inferência fuzzy

Em um sistema de inferência *fuzzy*, as regras são definidas por especialistas no domínio, e os membros do sistema são modelados usando funções de pertinência. O sistema opera considerando as regras e as entradas para determinar a saída *fuzzy*, que é posteriormente defuzzificada para obter um valor nítido que representa a ação a ser tomada, como apresentado na Figura 3 (Bose; Mali, 2019).

Figura 3 – Sistema de inferência Fuzzy



Fonte: adaptado de Mamdani e Assilian (1975).

Para aplicação de um sistema de inferência, é necessário a construção de uma base de regras que relacionam as entradas com saídas *fuzzy*. No sistema de inferência de Mamdani, cada regra é geralmente expressa na forma "SE (antecedente) ENTÃO (consequente)", conforme apresentado na Equação 1, e descreve como as variáveis de entrada afetam as variáveis de saída em termos de conjuntos *fuzzy*, por meio da regra de composição max-min (Mamdani; Assilian, 1999).

$$R_i: \text{Se } x \text{ é } A_i \text{ Então } y \text{ é } B_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Em que, n é o número de regras, x é a variável linguística de entrada, y é a variável linguística de saída e A_i e B_i são subconjuntos fuzzy, respectivamente, dos universos U e V .

No processo de fuzzyficação, quando uma nova leitura é feita para as variáveis de entrada, essas leituras são mapeadas nos conjuntos *fuzzy* correspondentes usando as funções de pertinência associadas (Equação 2). O resultado é um conjunto de graus de pertinência que indicam o quanto cada valor de entrada pertence a cada conjunto *fuzzy*. Com isso, o sistema de inferência de Mandani pode aplicar as regras *fuzzy*, avaliando o grau de pertinência das regras com base nas entradas *fuzzy* e, em seguida, agregando os resultados para determinar a saída *fuzzy* (Mittal *et al.*, 2020).

$$\mu_{Ri}(x, y) = \max [\min(\mu_{Ai}(x), \mu_{Bi}(y))] \quad (2)$$

Em que, “min” (operador mínimo) é o operador de conjunção fuzzy, “max” (operador máximo) é um operador de disjunção fuzzy e $\mu_{Ai}(x), \mu_{Bi}(y)$ as funções de pertinência.

As variáveis de saída também são mapeadas em conjuntos *fuzzy* com funções de pertinência que indicam o grau de pertinência dos valores de saída a diferentes categorias. Para obter um valor de saída único e compreensível, é necessário um processo de defuzzificação, que converte os conjuntos *fuzzy* em um valor nítido. Técnicas de defuzzificação, como a do método do centro de gravidade de área (CGA) apresentada na Equação 3, são comumente usadas para realizar essa conversão. Neste caso, o valor de saída é aquele que divide ao meio a área da função de pertinência gerada pela combinação consequente das regras. O resultado da defuzzificação é uma saída nítida que representa a ação a ser tomada com base nas regras e nas entradas fornecidas. (Marques, 2022; Ross, 2010).

$$CGA = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_A(x)x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x)} \quad (3)$$

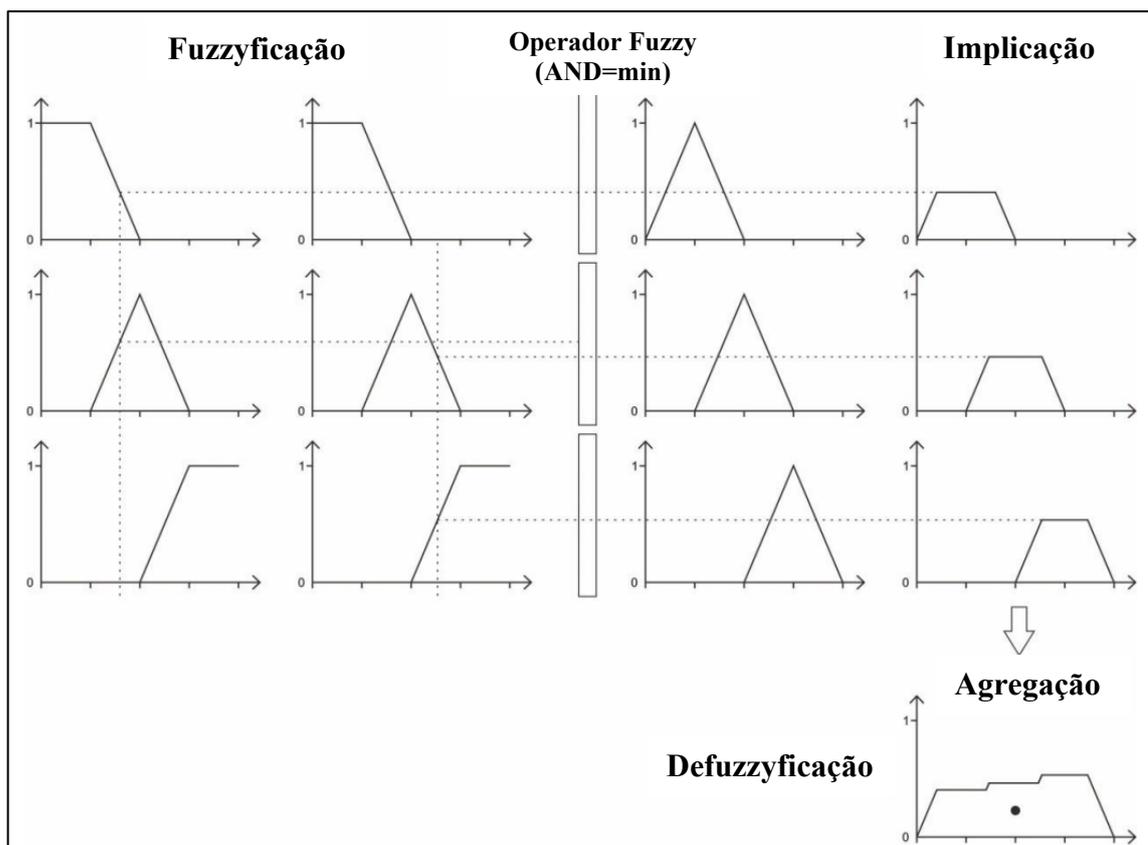
Em que, $\mu_A(x)$ funciona como o peso do valor x .

A Figura 4 mostra um exemplo de sistema de inferência Fuzzy de Mamdani com duas entradas e uma única saída, em que cada variável de entrada e saída possui três conjuntos *fuzzy* (Putri; Saputro, 2021). Nota-se que o processo de Fuzzyficação ocorre pelo operado “mín” e a defuzzyficação é realizada a partir do cálculo do CGA das frações inferiores das funções agregadas (operador “máx”), obtendo um valor numérico real.

Geramian e Abraham (2021) utilizaram o sistema de Mamdani para lidar com as deficiências do FMEA tradicional na classificação de clientes para o mercado. Łapczyńska (2023) utilizou o sistema de inferência de Mamdani associado ao FMEA para gestão de risco nas ações humanas de processo produtivo na indústria. Cruz-Rivero *et al.* (2022) utilizaram o FMEA *Fuzzy* para medição de metano e dióxido de carbono gerado pelo gado.

Testik e Unlu (2022) compararam o FMEA tradicional ao FMEA *Fuzzy* na identificação de áreas de risco em laboratórios de testes e calibração e validou que a substituição do FMEA tradicional é efetiva nos casos de avaliações subjetivas ou incompletas. Ribas *et al.* (2021) utilizaram *fuzzy* para mitigar a rigidez das escalas de classificação do FMEA e reduzir a imprecisão associada a subjetividade no monitoramento de ruptura de barragens hidrelétricas no Brasil, obtendo valor justo para priorização de ações e melhoria no processo de monitoramento.

Figura 4 – Exemplo de Sistema de Inferência Fuzzy de Mamdani



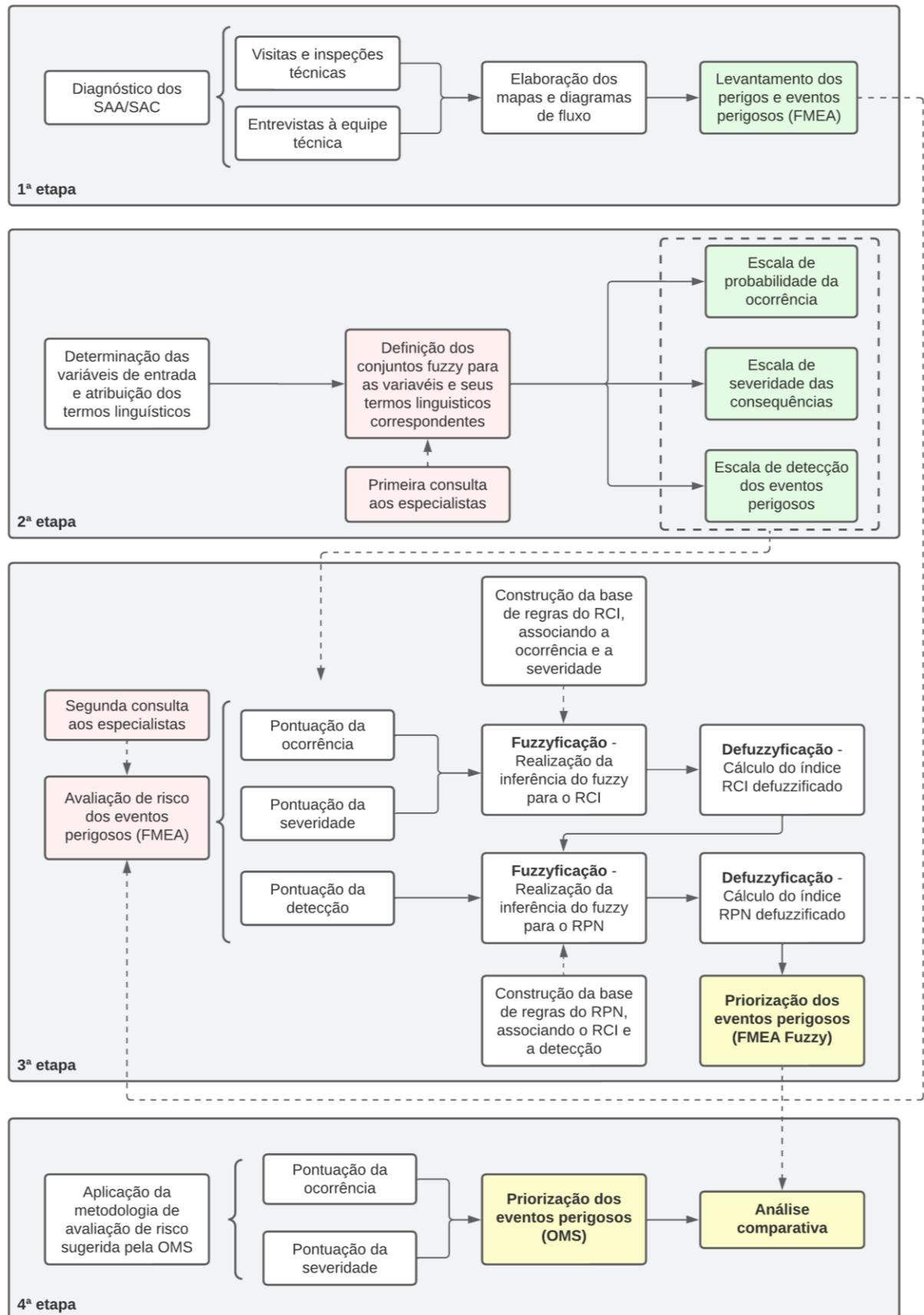
Fonte: adaptado de Putri e Saputro (2021).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi dividida em quatro etapas, apresentadas na Figura 5. A primeira se refere às fases preliminares do PSA necessárias para identificação dos eventos perigosos relacionados ao abastecimento de água nas comunidades rurais. A segunda etapa diz respeito à definição das escalas de probabilidade de ocorrência, severidade das consequências e detecção dos eventos perigosos que foram utilizadas como subsídio na avaliação de risco.

Por conseguinte, foi realizada a terceira etapa que se trata da avaliação de risco e, a partir da construção da base de regras do RCI e do RPN, utilizou-se o FMEA-*Fuzzy* para priorização dos eventos perigosos. Na última etapa, será utilizada a metodologia sugerida pela OMS para priorização dos eventos perigosos de modo a possibilitar uma análise comparativa entre esta e o modelo proposto neste trabalho.

Figura 5 – Etapas necessárias à realização do estudo



Fonte: Autoria própria (2024).

3.1 DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Ceará é o oitavo estado mais populoso do Brasil, com um contingente populacional de mais de 8,7 milhões de pessoas (IBGE, 2022). Segundo o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE) (2021), o Estado possui 22,6% dos habitantes localizados em áreas rurais, com um total de 17.500 comunidades por todo território. O estado apresentou destaque quanto ao avanço de políticas para desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade de vida nas comunidades rurais, principalmente no que diz respeito ao abastecimento de água, com iniciativas para instalação de SAA e SAC nessas áreas, beneficiando a qualidade de vida e promoção à saúde da população (Castro Neto, 2020; Roza; Araújo, 2020).

Na busca de avaliar a efetividade e fomentar ações voltadas ao abastecimento rural, a Fundação Nacional de Saúde (Funasa) selecionou 13 comunidades rurais do Estado do Ceará para, por meio da Portaria n° 6.339, de 17 de dezembro de 2021, participar do Termo de Execução Descentralizada (TED) n° 006/2021, celebrado entre esta e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O objetivo deste TED foi a elaboração dos Planos de Segurança da Água dos sistemas de abastecimento de água simplificados ou soluções alternativas coletivas no período de maio de 2022 a maio de 2024. As comunidades selecionadas estão distribuídas em quatro municípios (Aracati, Crateús, Tauá e Tianguá), localizados em regiões distintas do estado e possui tratamento da água conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Comunidades rurais participantes do TED n° 06/2021 Funasa/UFCG

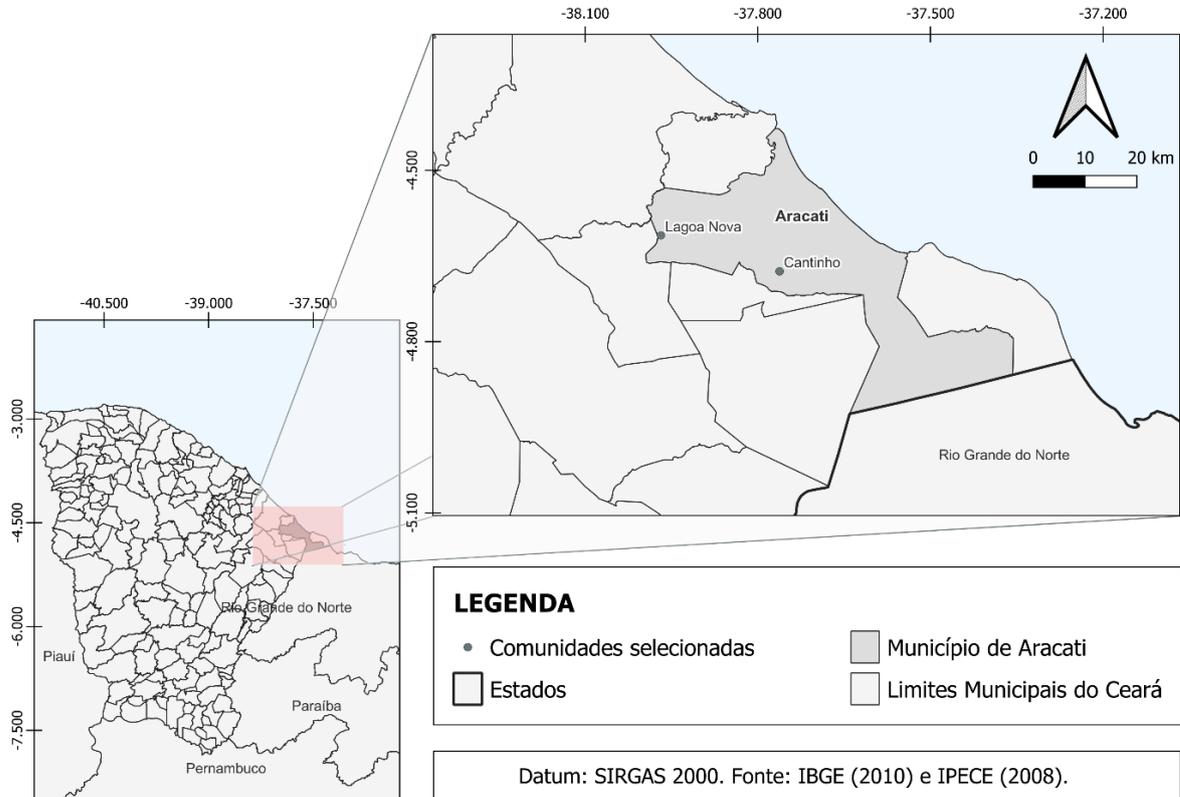
Município	Comunidade	Tipo de abastecimento	Tipo de tratamento
Aracati	Venâncio	SAA Venâncio	Simples desinfecção
	Lagoa Nova	SAA Lagoa dos Encantos	Pré-cloração, decantação, filtração e desinfecção
	Lagoa da Cruz		
	Lagoa dos Porcos		
	Lagoa dos Ferreiras	SAA Lagoa do Juá	Filtração e desinfecção
	Lagoa do Juá	SAC Cantinho	Ausente
Crateús	Carrapateira	SAA Carrapateira	Simples desinfecção
	Realejo	SAA Realejo	Simples desinfecção
Tauá	Calumbi	SAA Calumbi	Filtração e desinfecção
	Santo Antônio	SAA Santo Antônio	Simples desinfecção
Tianguá	Acarape	SAA Acarape	Simples desinfecção
	Tabocas	SAA Tabocas	Simples desinfecção

Fonte: Adaptado de WHO (2023).

Para a elaboração deste trabalho, a fins comparativos, foram escolhidas as comunidades rurais Lagoa Nova e Cantinho, localizadas no município de Aracati/CE (Figura 6), por estarem

incluídas num mesmo município e possuírem diferentes tipos de tratamento e distribuição da água, como pode ser observado no Quadro 2.

Figura 6 – Mapa de Localização



Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com o Censo demográfico do IBGE (2022), Aracati/CE possui 75.113 residentes, com uma média de 2,88 moradores por residência. Dos domicílios do município, 78,90% são abastecidos pela rede geral de água e apenas 26,49% conectados à rede de esgoto, os demais municípios utilizam soluções alternativas tanto para o abastecimento de água quanto para o esgotamento sanitário.

A comunidade Lagoa Nova, localizada a 25,9 quilômetros do distrito sede de Aracati/CE, possui sistema de abastecimento de água que contempla 13 comunidades vizinhas, chamado Sistema Simplificado Lagoa dos Encantos. Segundo informações da Prefeitura Municipal, em 2022, a comunidade possuía 53 residências (149 moradores), destas 10% não possuem banheiros, sendo as fossas sépticas e rudimentares a principal solução de esgotamento sanitário. Na referida comunidade, o abastecimento de água por rede de distribuição contempla 96% dos domicílios e a coleta de resíduos atende a comunidade semanalmente (Aracati, 2021; PSA/UFCG, 2023a).

As principais fontes de renda em Lagoa Nova são provenientes de programas do governo como Bolsa Família e Aposentadoria Rural. As famílias possuem também outras fontes de renda como a agricultura, principalmente o cultivo do caju e da mandioca. A pecuária é resumida a criação de animais em menor escala, nos quintais das casas. Nos períodos de cheia das lagoas, a piscicultura é desenvolvida, na maioria dos casos para consumo familiar (PSA/UFCG, 2023a).

Enquanto a comunidade Cantinho, localizada a 20,3 quilômetros do distrito sede de Aracati/CE, possui seis soluções alternativas coletivas distribuídas pela comunidade para atendimento da população. A comunidade é dividida em três localidades: Canto Grande, Tabuleiro (Cantinho de Cima) e Manipuçar, totalizando cerca de 320 domicílios e 478 pessoas. De acordo com o PMSB de Aracati/CE (2021), o município possui 7,3% das moradias construídas de taipa ou outros materiais que não alvenaria, realidade encontrada em algumas residências de Cantinho.

No que diz respeito ao abastecimento de água, cerca de 15,7% dos domicílios de Canto Grande e 23,5% de Manipuçar, possuem ligações de água chegando até as residências, por iniciativa dos próprios munícipes que fazem conexão direta de tubulação nos chafarizes dispostos na comunidade. Em levantamento da Prefeitura Municipal na comunidade Cantinho, identificou-se que, em 2021, 7,7% dos domicílios não possuíam banheiro, 68,2% possuíam como solução fossas sépticas e 24,1% utilizavam soluções irregulares. As fontes de renda da comunidade Cantinho se assemelham às de Lagoa Nova, acrescida do beneficiamento das palhas de carnaúba para produção de cera e artesanato (Aracati, 2021; PSA/UFCG, 2023b).

3.2 PRIMEIRA ETAPA: PERIGOS E EVENTOS PERIGOSOS

A primeira etapa deste trabalho se deu a partir da identificação dos perigos e eventos perigosos presentes no SAA e nas SAC das comunidades rurais em estudo, por meio de diagnóstico técnico, de consulta a representantes de entidades e técnicos operacionais e da elaboração dos diagramas de fluxo do abastecimento de água local. Inicialmente, foi realizada uma descrição prévia dos equipamentos utilizados para o fornecimento de água no SAA e nas SAC. O estudo considerou os eventos perigosos de maneira análoga aos modos de falha do FMEA, visto que estão associados à identificação de possíveis problemas que podem comprometer a prestação do serviço de água de forma segura.

A OMS (2023a) e o Ministério de Saúde (MS) (2012) indicam a confirmação da descrição do sistema por meio de visitas de campo. No desenvolvimento desta pesquisa, foram realizadas visitas e inspeções técnicas *in loco*, em cinco etapas (maio, julho e novembro de 2022 e março e agosto de 2023), pela equipe do TED n° 06/2021 Funasa/UFCG, para identificação e verificação das condições físicas dos equipamentos utilizados no abastecimento, desde a captação até a rede de distribuição.

Salienta-se que, no âmbito do TED n° 06/2021 Funasa/UFCG, para identificação dos problemas relacionados à qualidade da água bruta e tratada, foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas. A equipe técnica de desenvolvimento do TED realizou as análises *in situ* e para as análises laboratoriais foi contratada empresa de referência estadual. A amostragem foi realizada em cinco campanhas num período de seis meses (janeiro a junho de 2023), atendendo aos parâmetros de cor aparente, turbidez, temperatura, pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, cloro residual livre, sólidos dissolvidos totais, cloretos, dureza total, ferro, manganês, condutividade elétrica, coliformes fecais e *Escherichia Coli*.

Além disso, foram realizadas consultas e reuniões com representantes do comitê de bacias hidrográficas, presidentes das associações comunitárias, operadores dos SAAs, equipe técnica do Sisar e representantes da Prefeitura Municipal, visto que a determinação de eventos perigosos e perigos também requer a avaliação de eventos e informações do passado (OPAS, 2011).

As consultas foram realizadas a fim de contribuir no levantamento de informações sobre problemas já ocorridos quanto à captação, tratamento, reservação e distribuição de água, o uso e ocupação do solo e as contribuições da área da bacia hidrográfica que possam gerar algum risco à qualidade da água distribuída, bem como na identificação dos procedimentos operacionais do SAA e das SAC.

Para elaboração dos mapas e diagramas de fluxo foi realizado levantamento georreferenciado dos equipamentos do sistema de abastecimento e o traçado da rede de distribuição em campo, por meio do aplicativo *Osmand* que permite realizar registros fotográficos com coordenadas geográficas.

Os mapas do SAA e das SAC das comunidades rurais foram elaborados utilizando-se a função “Importar fotos georreferenciadas” do QGIS 3.34, para coleta de dados de latitude e

longitude dos equipamentos do sistema. No traçado da rede de distribuição foram inseridas linhas para unir os nós e as pontas de rede identificados. Salienta-se que foram utilizadas as *shapefiles* de corpos d'água disponíveis no Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará (2020), elaboradas pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) do Estado.

Associando as informações coletadas nas consultas e inspeções técnicas aos mapas gerados, foi construído um diagrama de fluxo que apresenta informações de fonte e tipos de captação da água bruta, etapas do tratamento, detalhamento das estruturas de reservação, extensão da rede de distribuição e áreas atendidas pelo sistema.

Os manuais de elaboração de PSA da OMS, da OPAS e do MS, em confronto com as informações coletadas e os diagramas de fluxo, subsidiaram a identificação e seleção dos eventos perigosos presentes em cada etapa do abastecimento das comunidades em estudo e os perigos biológicos, químicos, físicos, radiológicos e quantitativos associados a estes (WHO, 2023a; OPAS, 2011; Brasil, 2012).

Além dos eventos perigosos citados nos manuais, foi utilizado banco de dados de Corrêa (2020) que contém 166 possíveis eventos perigosos em sistemas e soluções de abastecimento de comunidades rurais, levantados a partir de pesquisa documental e bibliográfica. Após a seleção dos eventos perigosos presentes no SAA e nas SACs, foi realizada a determinação dos perigos associados a cada um destes. Os eventos perigosos identificados foram validados em oficinas comunitárias, realizadas pelo TED n° 06/2021 Funasa/UFCG, com representantes comunitários, bem como com a equipe técnica de operação do sistema, para estarem adequadas à realidade local.

3.3 SEGUNDA ETAPA: CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS FUZZY

A avaliação de risco associado a cada evento perigoso no PSA deve ser adaptada à realidade local, de modo a garantir a priorização efetiva destes (WHO, 2023a). Assim, neste trabalho foi utilizado o método FMEA para a avaliação dos SAA e SAC em comunidades rurais que, a partir de consulta à especialistas, define a probabilidade de ocorrência, a severidade das consequências e a efetividade de detecção para cada evento perigoso identificado na primeira etapa.

Para incorporar a lógica *Fuzzy* ao FMEA tradicional, foi necessário realizar a construção dos conjuntos *Fuzzy* das variáveis ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D), apresentados no Quadro 3, determinadas como variáveis de entrada do modelo. Para cada variável de

entrada, foram atribuídos os termos linguísticos e suas descrições, definidos de maneira a representar de forma fidedigna a classe escolhida.

Nesta pesquisa, foi realizado o aprimoramento das descrições dos termos linguísticos em avaliações semiquantitativas de riscos, como é o caso do PSA, para auxiliar na redução da subjetividade associada às respostas de especialistas. Isso proporciona aos avaliadores uma compreensão mais clara e consistente de cada termo, resultando em avaliações mais realistas e confiáveis. Em cada variável, há uma forma mais natural de explicitar a posição de cada alternativa avaliada, seja em termos quantitativos ou da linguagem comum. Essa definição deve ser realizada para cada modelo de forma adequada à realidade analisada (Menezes, 2020; Sant’Anna; Pinto Jr, 2010).

Para isso, foi utilizado o método de grupo focal, que utiliza sessões grupais de discussão, centralizando um tópico específico a ser debatido entre os participantes, para definir as descrições dos termos linguísticos (Ressel *et al.*, 2008). As escalas de probabilidade de ocorrência e severidade das consequências foram adaptadas dos manuais de elaboração de PSA da OMS e do MS para a realidade de áreas rurais (WHO, 2023; OPAS, 2011; BRASIL, 2012).

A escala de detecção foi adaptada de Bowles e Paláez (1995) que utilizou FMEA para priorizar ações corretivas associada a lógica *Fuzzy*, e de Haider *et al.* (2021), que utilizou FMEA *Fuzzy* para avaliação de risco e gestão da qualidade de água. Os autores propuseram uma escala com termos linguísticos que classificam desde os eventos perigosos sem detecção àqueles com detecção muito alta, conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Termos linguísticos da probabilidade de ocorrência, severidade das consequências e detecção dos eventos perigosos

Ocorrência	Severidade	Deteção	Tradicional	FRPN
Improvável	Pouco severo	Muito Alta	1	2
Pouco provável	Medianamente severo	Alta	2	4
Provável	Severo	Moderada	3	6
Muito provável	Muito severo	Baixa	4	8
Extremamente provável	Extremamente severo	Sem deteção	5	10

Fonte: Adaptado de WHO (2023) e Bowles e Paláez (1995).

Após a descrição das variáveis de entrada, foi realizada, por meio do *Google Forms* (Apêndice A), a primeira consulta a 15 profissionais que estivessem envolvidos em pesquisas de saneamento ou atuassem na prestação de serviços de abastecimento de água, principalmente com experiência em ambientes rurais. Esta consulta visou determinar valores atribuídos aos

conjuntos *Fuzzy* de cada termo linguístico das variáveis O, S e D, em um universo de discurso que varia de 1 a 10. Em seguida, foram construídas as funções de pertinência triangulares (TMF) ou trapezoidais (TMRF), por meio do *Excel* e do *RStudio*. Para isso, foram configurados os parâmetros das funções de pertinência (pontos médios e larguras), a partir dos resultados obtidos na consulta, que influem em como os valores de entrada são associados aos conjuntos *fuzzy* no sistema.

Salienta-se que a metodologia tradicional estabelecida pela OMS define os valores de cada termo linguístico conforme o Quadro 3, quando da aplicação destes em escala real. A fins comparativos, optou-se por manter a proporção entre os valores da indicados pela OMS e o sugerido por este trabalho, ajustando-os apenas ao domínio sugerido. Ou seja, quando um evento perigoso é considerado “improvável”, este foi submetido à matriz de risco com valor “1”, já quando aplicado na metodologia do FRPN, possuirá valor “2”.

3.4 TERCEIRA ETAPA: PRIORIZAÇÃO DOS EVENTOS PERIGOSOS – FMEA-FUZZY

Para simplificar a etapa de sistema de inferência *Fuzzy* (SIF), esta foi dividida em duas partes, de modo a reduzir a quantidade de regras a serem avaliadas e obter melhor efetividade nas respostas. O primeiro SIF associou a probabilidade de ocorrência à severidade das consequências para obtenção do índice de Criticidade de Risco (RCI), já o segundo combinou o valor nítido do RCI à detecção para obtenção do número de priorização de risco fuzzificado (FRPN). No sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani, a base de regras é uma ferramenta utilizada para analisar os resultados da estrutura do modelo por meio de um conjunto “SE-ENTÃO”, onde as condições (premissas) e conclusões (consequências) são expressas por funções de pertinência *fuzzy*, permitindo a modelagem de sistemas complexos com base em conhecimento heurístico e impreciso. (Mamdani; Assilian, 1997).

As escalas de ocorrência e severidade, expressas nos termos linguísticos do Quadro 3, foram combinadas a partir do operador “e”, para a construção da base de regras do RCI, apresentada no Quadro 4. Para isso, foi utilizado o intervalo do RCI sugerido por Ribas *et al.* (2021), com níveis que variam de 1 (risco muito baixo) a 20 (risco muito alto) para reduzir a falta de monotonicidade associado ao uso de variáveis discretas. Por exemplo, um evento perigoso improvável de ocorrer e pouco severo nas consequências à saúde pública, possui o RCI de 1 (muito baixo). Salienta-se que foram determinadas as regras para todas as

combinações possíveis da ocorrência à severidade, gerando o gráfico de superfície do Índice de Criticidade de Risco.

Quadro 4 – Base de regras para o primeiro SIF

SE		ENTÃO
Ocorrência	Severidade	RCI
Improvável	Pouco severo	Muito Baixo
Improvável	Medianamente severo	Muito Baixo
Improvável	Severo	Baixo
Improvável	Muito severo	Médio
Improvável	Extremamente severo	Alto
Pouco provável	Pouco severo	Muito baixo
Pouco provável	Medianamente severo	Baixo
Pouco provável	Severo	Médio
Pouco provável	Muito severo	Alto
Pouco provável	Extremamente severo	Alto
Provável	Pouco severo	Muito baixo
Provável	Medianamente severo	Baixo
Provável	Severo	Médio
Provável	Muito severo	Alto
Provável	Extremamente severo	Muito alto
Muito provável	Pouco severo	Médio
Muito provável	Medianamente severo	Alto
Muito provável	Severo	Alto
Muito provável	Muito severo	Muito alto
Muito provável	Extremamente severo	Muito alto
Extremamente provável	Pouco severo	Médio
Extremamente provável	Medianamente severo	Médio
Extremamente provável	Severo	Alto
Extremamente provável	Muito severo	Muito alto
Extremamente provável	Extremamente severo	Muito alto

Fonte: Autoria própria (2024).

Em seguida, foi realizada a segunda consulta aos especialistas para avaliação de cada um dos eventos perigosos elencados na primeira etapa, por meio do FMEA, tanto para ocorrência e severidade, como para a detecção. Para a avaliação foram utilizados os termos linguísticos definidos na segunda etapa. Nesta fase, foram consultados, por meio de grupo focal para preenchimento de planilhas no *Excel*, os técnicos envolvidos no desenvolvimento do TED nº 06/2021 Funasa/UFCG, uma vez que estes possuem conhecimento prévio do abastecimento de água das comunidades em estudo.

As funções de pertinência definidas na etapa anterior foram utilizadas para transformar os valores linguísticos de entrada em graus de correspondência com os valores nítidos a serem

estimados para o RCI, através da comparação da ocorrência com a severidade. Essa combinação foi realizada a partir da metodologia de Mamdani “max-min”, que combina os graus de pertinência dos conjuntos *fuzzy* de saída quando várias regras são ativadas, por meio do *RStudio* (Mamdani; Assilian, 1997; Teixeira, 2022).

Portanto, o operador “min” encontra o valor mínimo (menor grau de pertinência) entre os conjuntos *fuzzy* de saída de todas as regras ativadas, por meio da interseção entre os conjuntos *fuzzy* dos antecedentes. Já o operador “max” encontra o valor máximo (maior grau de pertinência) entre os conjuntos *fuzzy* de saída de todas as regras ativadas (Geramian; Abraham, 2021).

Após a aplicação dos operadores mínimo e máximo, o resultado é um conjunto fuzzy que representa a ativação das regras em relação aos conjuntos *fuzzy* de saída. Em seguida, o método do centro de gravidade de área (CGA) foi utilizado para o processo de defuzzyficação do RCI, que converte os valores *fuzzy* obtidos em um valor numérico real. As funções de pertinência e os graus de correspondência associados geraram uma representação geométrica que definem um polígono dividido por uma linha horizontal em subáreas superiores e inferiores iguais, o valor nítido do RCI é obtido a partir do cálculo do CGA da subárea inferior, conforme apresentado na Figura 4 (Ribas *et al.*, 2021). Os valores de saída do RCI foram normalizados por meio do método escalar de máximo e mínimo, que reescala os dados no intervalo estabelecido, por meio da fórmula:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

Em que, X' é o valor de saída normalizado, X é o valor inicial e X_{max} e X_{min} são os valores mínimo e máximo do conjunto de dados original.

Foi elaborada uma escala de classificação para os valores reais de saída do RCI baseada na avaliação de risco propostas pela OMS (2023a) e pelo MS (2012), que possui cinco termos linguísticos (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto), utilizados para a determinação das funções de pertinência do RCI. A saída normalizada e classificada torna-se parâmetro de entrada do segundo SIF. Os mesmos processos foram utilizados para o segundo sistema de inferência *fuzzy*, que correlaciona os termos linguísticos da escala do RCI junto a detecção, por meio da base de regras estabelecida no Quadro 5 e, por fim, estima o valor real do FRPN.

Quadro 5 – Base de regras para o segundo SIF

SE		ENTÃO
RCI	DETECÇÃO	FRPN
Muito baixo	Muito Alto	Baixo
Muito baixo	Alto	Baixo
Muito baixo	Moderado	Baixo
Muito baixo	Baixo	Moderado-baixo
Muito baixo	Muito Baixo	Moderado-baixo
Baixo	Muito Alto	Baixo
Baixo	Alto	Moderado-baixo
Baixo	Moderado	Moderado-baixo
Baixo	Baixo	Moderado-baixo
Baixo	Muito Baixo	Moderado-alto
Médio	Muito Alto	Moderado-baixo
Médio	Alto	Moderado-alto
Médio	Moderado	Moderado-alto
Médio	Baixo	Moderado-alto
Médio	Muito Baixo	Alto
Alto	Muito Alto	Moderado-alto
Alto	Alto	Alto
Alto	Moderado	Alto
Alto	Baixo	Alto
Alto	Muito Baixo	Muito Alto
Muito alto	Muito Alto	Alto
Muito alto	Alto	Alto
Muito alto	Moderado	Alto
Muito alto	Baixo	Muito Alto
Muito alto	Muito Baixo	Muito Alto

Fonte: Autoria própria (2024).

As saídas normalizadas do FRPN foram classificadas em escala de priorização e mitigação de risco com cinco classes (baixo, moderado-baixo, moderado-alto, alto e muito alto), conforme Tabela 1, baseou-se em Haider *et al.* (2021), Ferreira (2023) e String *et al.* (2019).

Tabela 1 – Escala de avaliação dos riscos do FRPN

Nível de Risco	FRPN	Descrição
Baixo	0-250	Geralmente, nenhuma ação imediata é necessária. Monitoramento contínuo é recomendado para garantir que os riscos não aumentem.
Moderado-baixo	250-500	Ações de mitigação podem ser necessárias, mas não são urgentes. Planejamento para abordá-los a médio prazo é suficiente.
Moderado-alto	500-700	Ações de mitigação devem ser planejadas e implementadas em um prazo mais curto, com revisões regulares e ajustes no planejamento.
Alto	700-850	Urgência nas ações de mitigação, devido à alta severidade ou probabilidade de ocorrência ou baixa detecção dos eventos perigosos.
Muito alto	850-1000	As ações devem ser imediatas e de prioridade máxima, a fim de evitar danos graves ao SAA/SAC e à saúde da população.

Fonte: Adaptado de Haider *et al.* (2021), Ferreira (2023) e String *et al.* (2019).

3.5 QUARTA ETAPA: ANÁLISE COMPARATIVA

Na última etapa, foi utilizada a pontuação (pesos) sugerida pela OMS (2023a), apresentada na Tabela 2, para avaliação de risco dos eventos perigosos, por meio dos termos linguísticos da escala de probabilidade de ocorrência e severidade das consequências. A priorização dos eventos perigosos é obtida a partir do produto entre os pontos da ocorrência e severidade. Esse resultado foi avaliado na matriz de priorização, que classifica os riscos em:

- Baixo: valores menores ou iguais que cinco;
- Moderado: valores entre seis e quatorze;
- Alto: valores iguais ou maiores que quinze (WHO, 2023a).

Tabela 2 – Matriz de avaliação dos riscos sugerida pela OMS

		Severidade				
		Peso 1 Pouco severo	Peso 2 Medianamente severo	Peso 3 Severo	Peso 4 Muito severo	Peso 5 Extremamente severo
Ocorrência	Peso 1 Improvável	1	2	3	4	5
	Peso 2 Pouco provável	2	4	6	8	10
	Peso 3 Provável	3	6	9	12	15
	Peso 4 Muito provável	4	8	12	16	20
	Peso 5 Extremamente provável	5	10	15	20	25

Fonte: Adaptado de WHO (2023a).

Esta avaliação foi realizada pela mesma equipe técnica que priorizou os eventos perigosos na terceira etapa. Por meio da geração de gráfico comparativo, na metodologia de *slope chart*, com os resultados dessa priorização, foi possível avaliar as posições de prioridade dos eventos perigosos obtidos e, ainda, verificar como o modelo FMEA-*Fuzzy* se adequa a cada um dos cenários avaliados (SAA e SAC). Além disso, também foi possível perceber se o modelo proposto também reduziu a quantidade de empates entre eventos perigosos com o mesmo grau de risco que se obtém na aplicação da metodologia tradicional.

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA

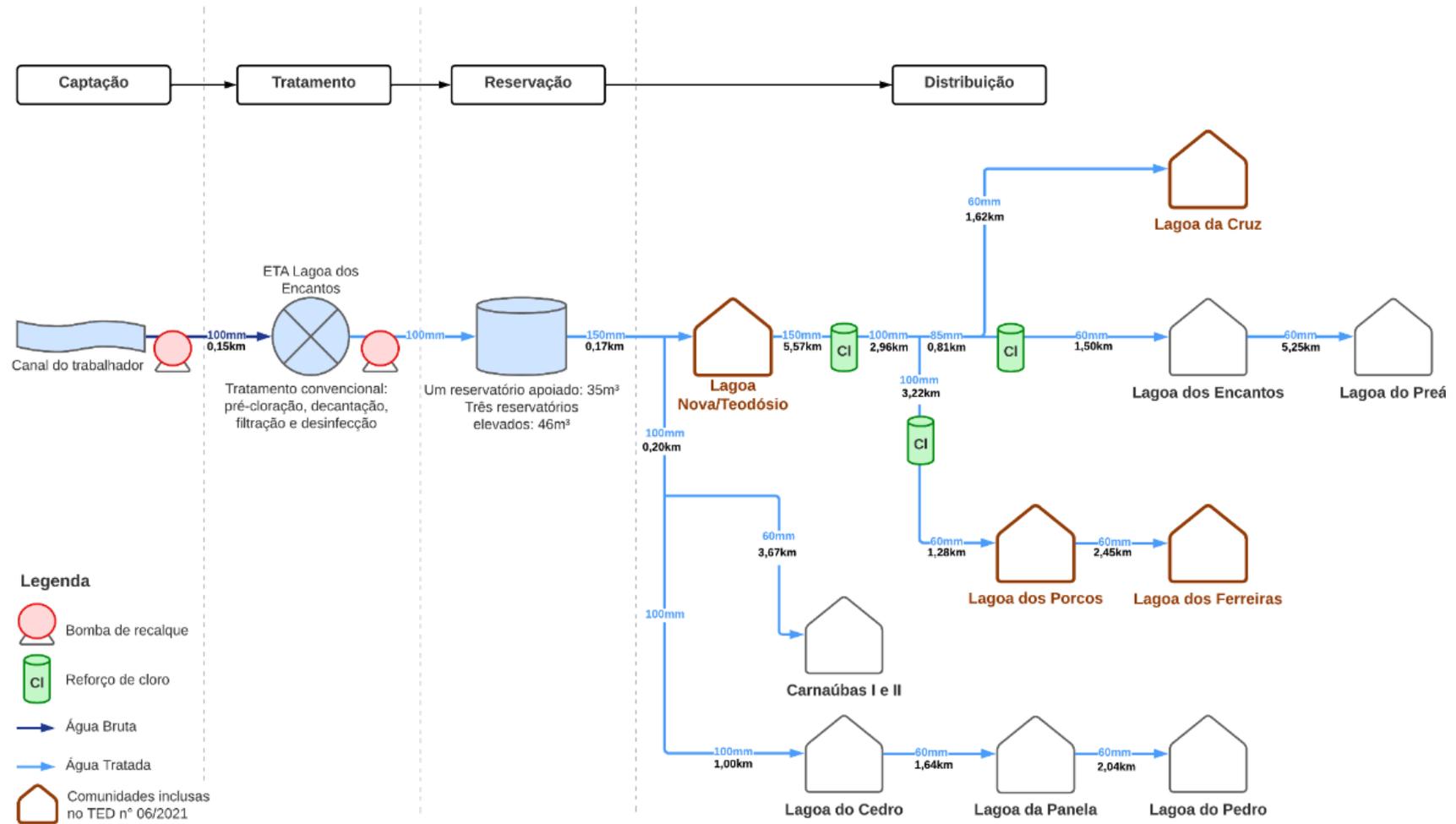
4.1.1 Sistema de abastecimento de água Lagoa dos Encantos

Na caracterização realizada no SAA Lagoa dos Encantos, foi possível elaborar o diagrama de fluxo (Figura 7), que auxiliou na identificação de eventos perigosos presentes no sistema. O diagrama apresenta um resumo das etapas (captação, tratamento, reservação e distribuição) e define o fluxo da água no sistema, indicando-o por setas tanto para a água bruta como para a água tratada (Pundir *et al.*, 2021). É possível perceber também os pontos de reforço de cloro e a extensão da rede à cada comunidade.

Nas visitas técnicas, identificou-se que a captação do Sistema Lagoas ocorre por meio da outorga de uso COGERH nº 01015/20 no Canal do Trabalhador, que transporta água do Rio Jaguaribe para o Açude Pacajus, ou no sentido inverso, dependendo do período do ano. No ponto de captação, o canal possui seção trapezoidal com 12m de largura e 3m de profundidade. Com extensão de 113km, o canal foi construído para abastecer a Região Metropolitana de Fortaleza, entretanto beneficiou as comunidades adjacentes para instalação de sistemas de abastecimento rurais. O manancial é utilizado de forma clandestinas para outras atividades como pesca, recreação, dessedentação de animais, entre outros, que podem gerar a contaminação da água e acarretar riscos ao abastecimento local (Cardoso; Cruz; Bezerra, 2020; Pereira; Barbosa; Medeiros, 2023).

A captação é realizada por bomba submersa automatizada com motor de 3cv de potência, que possui vazão de 18m³/h. A água é conduzida até a Estação de Tratamento de Água (ETA) Lagoa dos Encantos por tubulação de recalque de polietileno de alta densidade (PEAD) com 100mm de diâmetro. Foi relatado que dificilmente ocorrem problemas relacionados ao funcionamento dos dispositivos e mesmo quando ocorrem interrupções na captação de água, a equipe técnica tem um prazo de 24 horas para realizar a manutenção (PSA/UFCG, 2023a)

Figura 7 – Mapa de Localização



Fonte: PSA/UFCG (2023a).

A ABNT NBR nº 12213/92 estabelece os critérios e elementos constituintes para os sistemas de captação superficial, que engloba barragens de nível, tomada de água (bombeamento), grade, tela, desarenador. Entretanto, no caso do Sistema Lagoas, a captação é realizada apenas com o bombeamento e desarenador, podendo apresentar riscos ao abastecimento de água. Segundo Santana Jr e Pedreiro (2023), diferente do que ocorre no SAA Lagoas dos Encantos, é importante a realização de manutenções frequentes tanto na captação como na adução. Além disso, avaliar o redimensionamento das estruturas a depender da demanda do Sistema, de modo a reduzir os riscos associados à etapa de captação.

A partir dessas informações, foi possível identificar os eventos perigosos e perigos apresentados no Quadro 4.

Quadro 6 – Eventos perigosos identificado na captação – Lagoa dos Encantos

Código	Evento perigoso	Perigo
C.1	Utilização de agrotóxicos e fertilizantes em torno da fonte de água	químico
C.2	Falta de proteção (cerca imprópria), permitindo acesso de animais e pessoas	microbiológico; químico; físico; quantitativo
C.3	Falta de placa de aviso sobre captação	microbiológico; químico; físico
C.4	Abate de animais em torno da fonte	microbiológico; físico
C.5	Falha elétrica	quantitativo
C.6	Disposição de resíduos sólidos em torno da fonte e/ou recebe seus lixiviados	microbiológico; químico; físico
C.7	Presença de fossa rudimentar a montante; contaminação fecal através de lixiviação de resíduos humanos ou de animais	microbiológico; químico
C.8	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	químico; físico; microbiológico; quantitativo
C.9	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	químico; físico; microbiológico; radiológico
C.10	Presença de carcaças de animais ao redor da fonte	microbiológico
C.11	Ocorrência de cheia ou inundação; inviabilização temporária na captação de água	físico; microbiológico; quantitativo
C.12	Presença de pessoas com comportamento inadequado e falta de higiene em torno da fonte	microbiológico; físico; químico; quantitativo
C.13	Lavagem de roupas e banho na área de captação	microbiológico; químico; físico
C.14	Lançamento de efluentes (domésticos ou industriais) em torno da fonte	microbiológico; químico; físico
C.15	Presença de necrochorume de cemitério em torno da fonte	microbiológico; físico; químico
C.16	Presença elevada de algas na área de captação	microbiológico; físico; químico

Quadro 4 – Eventos perigosos identificados na captação – Lagoa dos Encantos (continuação)

Código	Evento perigoso	Perigo
C.17	Chuvas intensas com elevação na turbidez da água	microbiológico; físico
C.18	Falha mecânica e estrutural no sistema de captação	físico; quantitativo
C.19	Ocorrência de seca, inviabilizando a captação	microbiológico; químico; físico; quantitativo
C.20	Entupimentos e/ou assoreamento na área de captação	físico; quantitativo
C.21	Contaminação da água provocada por acidentes e/ou incêndios	microbiológico; químico; físico; radiológico
C.22	Aquicultura (psicultura ou carcinicultura) no reservatório ou a montante	microbiológico; químico; físico
C.23	Contaminação por água salina / água do mar	físico; químico
C.24	Contaminação residual da água provocada pelo tráfego (carros, barcos, área de estacionamento etc.)	físico; químico
C.25	Contaminação da água provocada por atividade recreativa ou atividades afins	microbiológico; químico; físico
C.26	Existência de outra fonte de poluição até 10 metros da fonte	microbiológico; químico; físico; radiológico

Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023a) e Correa (2020).

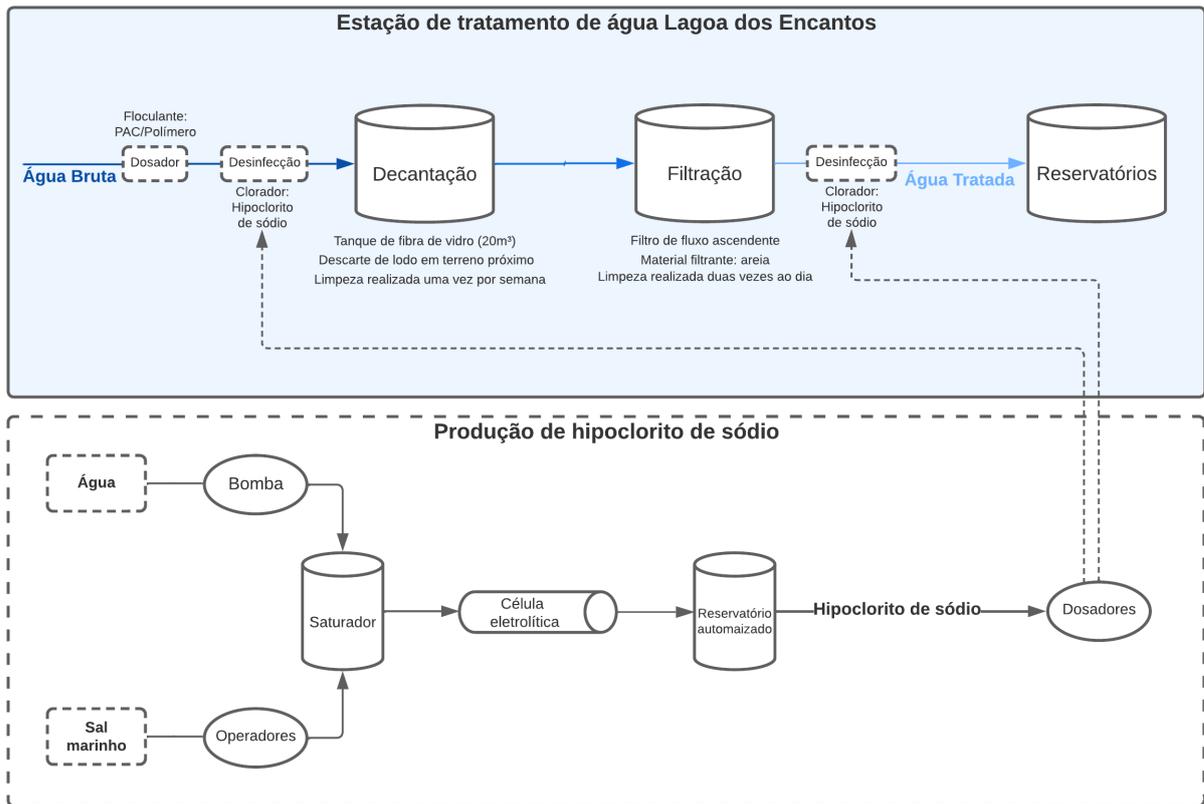
Na ETA Lagoa dos Encantos, que possui capacidade de fornecimento de 23m³/h, a água é submetida aos processos de pré-cloração, decantação, filtração e desinfecção, conforme o diagrama da Figura 8. O produto utilizado tanto na pré-cloração quanto na desinfecção é o hipoclorito de sódio, produzido na casa de química da ETA em duas etapas: preparo e eletrólise da salmoura. Garcia (2018) concluiu que a utilização de sistema de cloração produzido *in loco*, além de atender a desinfecção exigida pela portaria de potabilidade, é mais econômica que outros métodos de cloração e, ainda, não apresenta riscos à saúde dos operadores e residentes das proximidades da ETA.

A etapa de decantação é realizada em tanque de fibra de vidro, com diâmetro de 3,0m e capacidade de armazenamento de 20,0 m³. De forma prévia, é aplicado o coagulante policloreto de alumínio, para geração de flocos rígidos que sedimentam e se acumulam no fundo do tanque. Devido a geração de lodo, a limpeza do tanque é realizada a cada sete dias, pelos operadores do sistema, descartando os resíduos em terreno próximo à ETA (PSA/UFCG, 2023a).

No SAA Lagoa dos Encantos, o lodo é descartado em terreno baldio ao lado da ETA, sem nenhum tratamento. Independentemente do tamanho da ETA, o gerenciamento do lodo deve ser realizado com destinação final ambientalmente adequada, de modo a não gerar riscos

de recontaminação da água e do solo (Silva; Achon; Isaac, 2022). Fendrich *et al.* (2024) analisaram diversas tecnologias de tratamento do lodo e concluíram que a utilização de abordagens sustentáveis, como a compostagem, podem reduzir os riscos associados e aumentar a proteção de saúde ambiental e pública da área da ETA.

Figura 8 – Etapas da ETA de Lagoa dos Encantos



Os reforços de cloro (ácido tricloroisocianúrico) estão localizados ao longo da rede de distribuição.

Fonte: PSA/UFCG (2023a).

No decantador, a água é coletada por canaleta superior e conduzida para o filtro de fluxo ascendente, com areia como material filtrante, que possui 2,0m de diâmetro e volume total de 10m³. A limpeza do filtro é realizada duas vezes ao dia, por meio do acionamento de bomba reversa, que injeta água no sentido inverso ao fluxo natural de filtração. A frequência pode variar de acordo com a sazonalidade do canal, entretanto a avaliação da frequência adequada é feita pelos operadores de acordo com as características organolépticas da água.

Dantas *et al.* (2022) identificaram eventos perigosos de caráter operacional na filtração de seis ETA, incluindo inadequações na lavagem e frequência por erro de operação, que podem gerar placas de lodo fixas no interior do filtro e vazamento da água de lavagem, bem como redução na quantidade de água produzida. A avaliação visual da água para regulação de

frequência de lavagem dos filtros, como ocorre na ETA Lagoa dos Encantos, pode acarretar erro de operação, elevando o risco associado a esta etapa do tratamento.

Quanto à cloração, os dosadores permanecem ligados continuamente, não havendo uma quantidade padronizada a partir do consumo da população, a dosagem é realizada a partir da experiência dos operadores e do acompanhamento da concentração na rede de distribuição por teste de colorimetria. Devido à extensão da rede, foram instalados três cloradores não automatizados de cloro pastilha (ácido tricloroisocianúrico, com 90% de teor de cloro ativo) para reforço da desinfecção de modo que houvesse o mínimo de cloro residual livre nas pontas de rede da distribuição (PSA/UFCG,2023a).

Batista (2024) verificou inconformidades de desinfecção nas amostras de água das comunidades Lagoa da Cruz e Lagoa dos Porcos, atendidas pelo SAA Lagoa dos Encantos, apesar da presença dos reforços de cloro entre a ETA e as comunidades. As inconformidades podem indicar que a dosagem por experiência dos operadores pode ser enviesada, de modo a trazer incertezas para a aplicação correta do produto, com conseqüente elevação nos riscos à saúde pública.

De acordo com a identificação realizada na ETA Lagoa dos Encantos, foi possível levantar nove eventos perigosos e perigos (Quadro 5) que podem comprometer o tratamento da água distribuída à comunidade.

Quadro 7 – Eventos perigosos identificados no tratamento – Lagoa dos Encantos

Código	Evento perigoso	Perigo
T.1	Falta de controle na quantidade de produto químico e dosagem	microbiológico; químico; físico
T.2	Ausência de medidas de segurança no armazenamento de produtos químicos	químico
T.3	Equipamento funcionando de forma irregular	microbiológico; químico; físico
T.4	Cloro residual livre insuficiente (baixa dosagem)	microbiológico
T.5	Excesso de cloro residual livre (alta dosagem)	químico; físico
T.6	Interrupção do fornecimento de produtos químicos por parte do prestador	microbiológico; físico
T.7	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	químico; físico; microbiológico; quantitativo

Quadro 5 – Eventos perigosos identificados no tratamento – ETA Lagoa dos Encantos (continuação)

Código	Evento perigoso	Perigo
T.8	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	químico; físico; microbiológico; radiológico
T.9	Baixa frequência de lavagem do filtro (mais de 48 horas entre as lavagens) ou lavagem de forma inadequada	microbiológico; físico

Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023a) e Correa (2020).

O Sistema Lagoas possui quatro reservatórios construídos em manilha de concreto armado com 3m de diâmetro, para armazenamento de água tratada, sendo um reservatório apoiado (35m³) e três elevados (46m³ cada). Nas visitas técnicas, foi relatado que os reservatórios não apresentaram problemas estruturais desde a sua construção em novembro de 2015.

As limpezas e manutenções dos reservatórios são realizadas a cada quatro meses, estando de acordo com o sugerido pela ANVISA. Salienta-se que os operadores, no processo de lavagem, devem seguir as etapas da norma ABNT NBR 5.626/2020, que indica o procedimento básico para realização de limpeza dos reservatórios. Entretanto, não foi possível identificar se a lavagem é realizada da forma correta, o que pode indicar um ponto de atenção, mesmo que a equipe técnica cumpra a frequência estabelecida.

Com base no diagnóstico e nas entrevistas com equipe de operação do SAA, foram selecionados os eventos perigosos e perigos associados para a reservação (Quadro 6). Vale ressaltar que a identificação de eventos perigosos está associada não apenas à eventos que já ocorreram no passado, mas também a possibilidade de ocorrência destes no futuro.

Quadro 8 – Eventos perigosos identificados na reservação – Lagoa dos Encantos

Código	Evento perigoso	Perigo
R.1	Acúmulo de fezes de animais na tampa do reservatório	microbiológico; químico
R.2	Inundação da válvula por águas superficiais	microbiológico; físico
R.3	Desprendimento de biofilme	microbiológico; químico; físico
R.4	Drenagem inadequada e acúmulo de água	microbiológico; físico
R.5	Reservatório de armazenamento está rachado, com vazamentos ou infiltração	microbiológico; físico; quantitativo

Quadro 6 – Eventos perigosos identificados na reservação – Lagoa dos Encantos (continuação)

Código	Evento perigoso	Perigo
R.6	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	químico; físico; microbiológico; quantitativo
R.7	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	químico; físico; microbiológico; radiológico
R.8	Práticas inadequadas de higiene e/ou ausência de limpeza do reservatório	microbiológico; químico
R.9	Estagnação da água devido ao baixo consumo, uso intermitente ou longos períodos sem uso	microbiológico; físico
R.10	Área sem proteção ou danificada; acesso de animais e pessoas	microbiológico; químico
R.11	Corrosão de materiais de construção	físico; químico
R.12	Acúmulo de biofilme	microbiológico; químico; físico

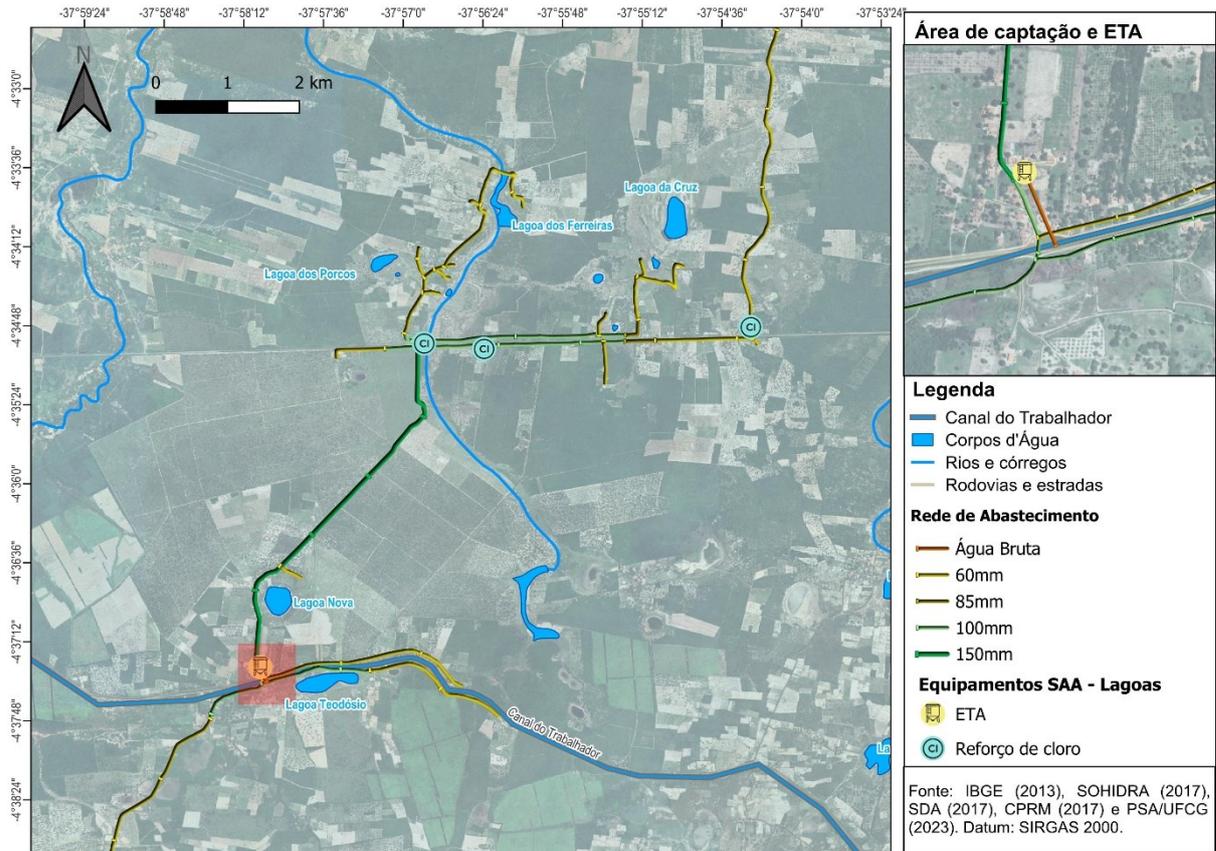
Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023a) e Correa (2020).

A rede de distribuição do Sistema Lagoas foi construída em 2015 com tubulações de PVC. Em 2021, atendia doze comunidades rurais com um total de 840 ligações, que tem se expandido ao longo dos anos com benfeitorias no sistema para abranger outras localidades. A expansão do sistema precisa ser realizada de forma associada ao aumento da capacidade da ETA, de bombeamento e vazão do sistema. Apesar de não associar um evento perigoso imediato, pode ser um indicativo de risco ao abastecimento no futuro.

Até as visitas técnicas, a distribuição era realizada de forma contínua e ininterrupta, havendo interrupções apenas na necessidade de manutenções. O sistema possui 17 pontas de rede, mas apenas oito possuem válvulas de descarga, que ficam expostas ao livre acesso de pessoas e animais (PSA/UFCG, 2023a).

Nas visitas técnicas foram coletados os dados georreferenciados, possibilitando a elaboração do mapa de distribuição apresentado na Figura 9. O mapa apresenta os diâmetros de cada trecho da rede de distribuição, variados entre 60mm e 150mm, além da ETA e dos reforços de cloro instalados no sistema.

Figura 9 – Mapa da rede de distribuição do SAA Lagoa dos Encantos



Fonte: Autoria própria (2024).

Foram identificados pontos de quebra frequentes nas tubulações, nas visitas técnicas, principalmente nas ligações de polietileno entre a rede geral e os hidrômetros, que podem gerar perda de pressão na rede de distribuição, além da possibilidade de contaminação da água tratada. A realização de manutenções periódicas na rede de distribuição e substituição das estruturas quebradas podem reduzir a possibilidade de riscos devido a problemática citada.

Além disso, o investimento em equipamentos de modernização do sistema para monitoramento da rede de distribuição podem minimizar os impactos do problema supracitado, visto que a contrapartida da equipe de operação poderá ser mais rapidamente realizada (Souza, 2016). Com isso, os problemas identificados na distribuição de água do SAA Lagoa dos Encantos estão dispostos nos 11 eventos perigosos apresentados no Quadro 7.

Quadro 9 – Eventos perigosos identificados na distribuição – Lagoa dos Encantos

Código	Evento perigoso	Perigo
D.1	Presença de ar na tubulação/ variação de pressão e intermitência na distribuição	microbiológico; físico; quantitativo
D.2	Presença de tubulações de esgoto e de água muito próximas (contaminação cruzada)	microbiológico; físico; químico
D.3	Contaminação da água por meio de canalização danificada; mistura de água de outras fontes	microbiológico; químico; físico
D.4	Contaminação da água por meio de canalização/rede exposta	microbiológico; químico; físico
D.5	Presença de biofilme	microbiológico; químico; físico
D.6	Práticas de higiene inadequadas durante reparo de tubulações	microbiológico
D.7	Contaminação da água por corrosão de tubos e válvulas de ferro	químico; físico
D.8	Existência de ponto de vazamento (perda de água)	físico; microbiológico; quantitativo
D.9	Existência de ponto de furto de água	quantitativo
D.10	Falta de monitoramento de qualidade da água na distribuição	microbiológico; químico; físico
D.11	Contaminação da água por cimento proveniente de revestimentos ou durante novas instalações	químico

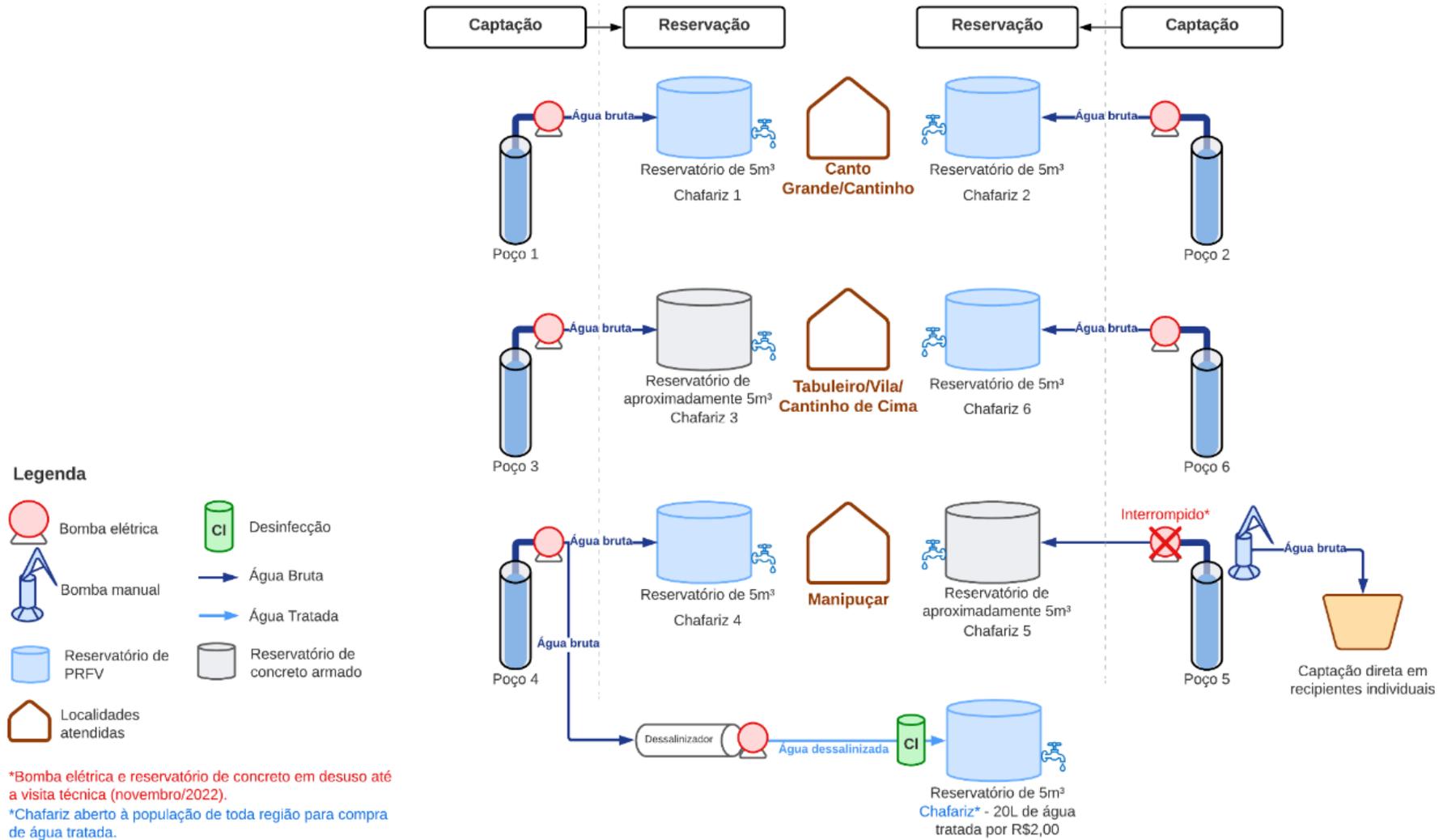
Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023a) e Correa (2020).

4.1.2 Soluções alternativas coletivas de Cantinho

As soluções alternativas coletivas de abastecimento de água adotadas na Comunidade Cantinho estão apresentadas no diagrama de fluxo da Figura 10. Estas foram construídas por meio de ações dos Governos Federal e Estadual, sendo seis chafarizes de água bruta e um de água tratada pelo processo de dessalinização. O diagrama se diferencia do apresentado para o SAA Lagoa dos Encantos, em virtude de não possuir rede de distribuição definida na comunidade, sendo estas de forma clandestina, por ligação direta dos chafarizes aos domicílios.

A captação de água na comunidade ocorre por meio de seis poços, sendo três tubulares profundos e três rasos. Na localidade Manipuçar, o poço é associado a dois chafarizes, um deles com dessalinizador para distribuição de água tratada (PSA/UFCG, 2023b).

Figura 10 – Diagrama de fluxo das SAC de Cantinho



Fonte: PSA/UFCG (2023b).

De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9.433, de 1997), os direitos de usos para abastecimento público por meio de captação de parcela de água de um corpo hídrico estão sujeitos a outorga pelo Poder Público, a fim de assegurar o controle quantitativo e qualitativo da água. Entretanto, não foram identificadas nenhuma outorga de uso para abastecimento humano requerida ou concedida para as localidades abastecidas pelos chafarizes.

Silva e Boas (2013) concluem que a água deve ser racionalizada de modo a atender os interesses dos envolvidos no seu entorno, desde econômico à ambiental, bem como o enquadramento das águas definidos por Lei. A ausência de outorgas e o uso descontrolado das fontes de recursos hídricos, como ocorre em Cantinho, acarretam circunstâncias danosas ao meio ambiente e a saúde pública.

Devido à ausência de gestão e operação das SAC, sob responsabilidade da Prefeitura Municipal, não foi possível identificar com detalhes as especificações técnicas dos equipamentos de captação utilizados. Nas visitas técnicas, verificou-se que o acionamento das bombas utilizadas ocorrem de forma manual e o estado de conservação destas são precários, como pode-se verificar na Figura 11.

Figura 11 – Estado de conservação das bombas de captação – Cantinho



Fonte: PSA/UFCG (2023b).

Segundo as informações coletadas, problemas relacionados ao funcionamento dos dispositivos são identificados de forma frequente pela população e, quando da necessidade de reparo nas bombas, o abastecimento é interrompido até que seja enviada equipe técnica da prefeitura. Na Figura 11, nota-se que as bombas não possuem proteção contra as intempéries, apenas soluções paliativas improvisadas pela população. Com isso, problemas de quebra do equipamento e de falhas no sistema de bombeamento podem indicar a necessidade de manutenções corretivas recorrentes.

Outras situações podem interferir na captação de água da comunidade Cantinho e comprometer o abastecimento de água local. Com as informações do diagnóstico, foi possível definir os eventos perigosos e perigos associados à captação de água nas SAC de Cantinho, apresentados no Quadro 8.

Quadro 10 – Eventos perigosos identificados na captação – Cantinho

Código	Evento perigoso	Perigo
C.1	Entrada de água contaminada por meio de rachaduras, orifícios e/ou equipamentos danificados	microbiológico; químico; físico
C.2	Presença de água estagnada ao redor do poço, devido à má drenagem	microbiológico; químico
C.3	Entrada de água contaminada durante inundações	microbiológico; físico; químico
C.4	Contaminação no equipamento de saída do poço	microbiológico
C.5	Falha no sistema elétrico ou na bomba	quantitativo
C.6	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	químico; físico; microbiológico; quantitativo
C.7	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	químico; físico; microbiológico; radiológico
C.8	Presença fossa rudimentar ou local de defecação a menos de 10 metros do poço	microbiológico
C.9	Entrada de animais por meio de tampas ou orifícios	microbiológico; químico
C.10	Presença de excrementos de animais ou humanos em torno do poço	microbiológico; químico
C.11	Uso de agrotóxicos em torno da fonte de água	químico
C.12	Limpeza e higiene inadequadas no poço	microbiológico; químico
C.13	Tubulações sujas	microbiológico; físico
C.14	Presença de depósito de resíduos sólidos ao redor do poço	microbiológico; químico; físico
C.15	Presença de animais até 50 metros do poço	microbiológico; químico
C.16	A área da base do mecanismo de bombeamento é permeável	microbiológico
C.17	Existência de outra fonte de poluição até 10 metros do poço	microbiológico; químico; físico; radiológico
C.18	Variação sazonal da vazão do poço	químico; físico; quantitativo

Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023b) e Correa (2020).

Dos chafarizes encontrados na comunidade Cantinho, apenas um realiza tratamento da água pelo processo de dessalinização. A medida paliativa sugerida pelo Ministério da Saúde é a distribuição de hipoclorito de sódio (2,5%) para desinfecção nos equipamentos de

armazenamento individuais, cuja distribuição é realizada de forma intermitente em Cantinho. Durante as visitas técnicas realizadas em novembro de 2022 foi informado que o produto não é disponibilizado pela Prefeitura Municipal há mais de três anos (PSA/UFCG, 2023b).

Jesus *et al.* (2023) trataram da eficácia de medidas domiciliares de desinfecção da água para consumo humano e identificaram que esta técnica é 100% eficaz na desinfecção da *E. Coli*, se utilizado como recomendado pelo Ministério da Saúde. O uso dessas medidas pode reduzir a disseminação de doenças de veiculação hídrica na realidade de comunidades rurais que possuem apenas água sem tratamento distribuída. Entretanto, a ausência de ações de conscientização e educação ambiental quando havia a distribuição do produto em Cantinho, acarretava o uso para outros fins, devido a resistência da população quanto aos parâmetros organolépticos.

As análises de parâmetros da qualidade da água indicaram a presença de *E. Coli* em todas as análises realizadas nos chafarizes, exceto na água distribuída pelo sistema de dessalinização. Além disso, foi identificado a concentração de altos teores de cloretos, acima do valor máximo permitido pela portaria de potabilidade para consumo humano (PSA/UFCG, 2023b). Estas avaliações corroboram com Bezerra *et al.* (2017) que avaliaram como inadequada a utilização da água sem tratamento, para chafarizes localizados em bairros do município de Fortaleza/CE, devido a presença de *E. Coli*. Além de associar este problema à ausência de distância mínima entre a fonte de captação e lançamentos inadequados de esgoto.

Como não há o tratamento de água nas soluções adotadas em Cantinho, exceto o dessalinizador, a seleção de eventos perigosos (Quadro 9) foi realizada com base na aplicação de soluções simplificadas de desinfecção, quando da captação de água por poços. Salienta-se que, para a proposição de ações e tomada de decisões dos gestores do abastecimento de água, deve-se considerar como prioridade a urgência em garantir a potabilidade da água fornecida à população.

Quadro 11 – Eventos perigosos identificados no tratamento – Cantinho

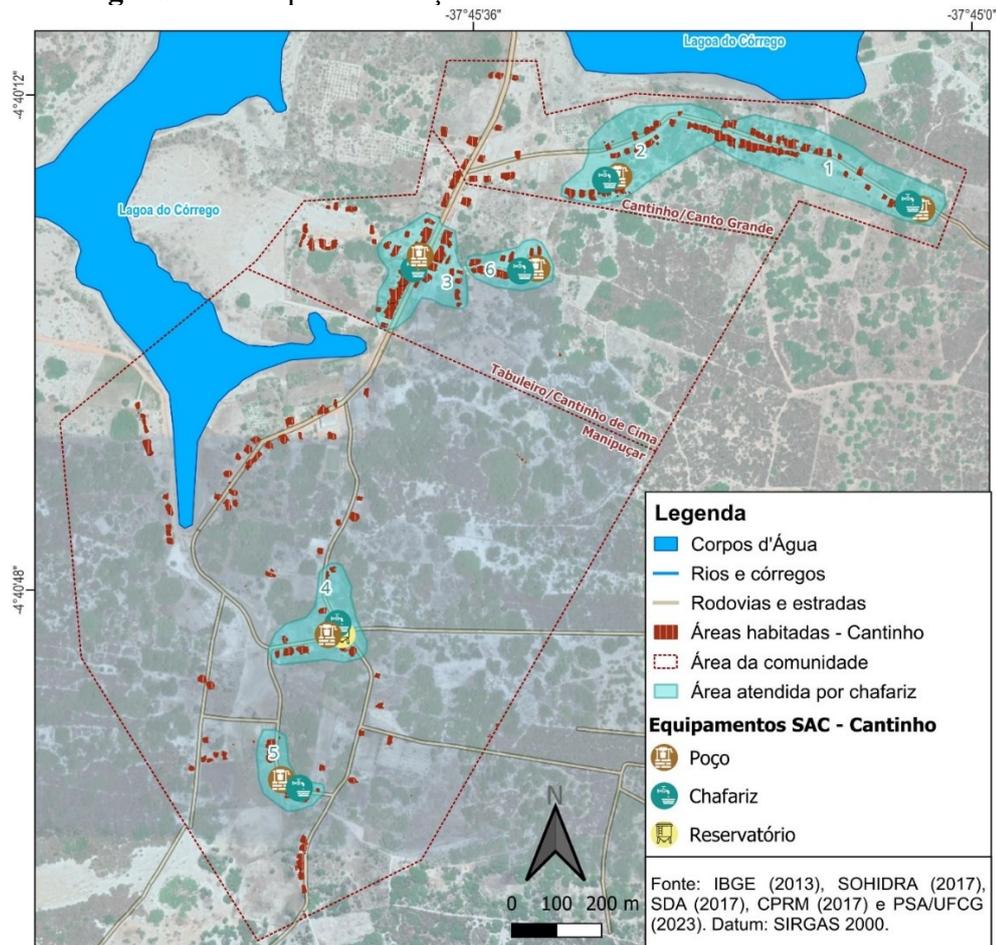
Código	Evento perigoso	Perigo
T.1	Falta de controle na quantidade de produto químico e dosagem	microbiológico; químico; físico
T.2	Ausência de medidas de segurança no armazenamento de produtos químicos	químico
T.3	Inexistência de equipamentos para tratamento	microbiológico; químico; físico
T.4	Cloro residual livre insuficiente (baixa dosagem)	microbiológico
T.5	Excesso de cloro residual livre (alta dosagem)	químico; físico

Quadro 9 – Eventos perigosos identificados no tratamento – Cantinho (continuação)

Código	Evento perigoso	Perigo
T.6	Interrupção do fornecimento de produtos químicos por parte do prestador	microbiológico; físico
T.7	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	químico; físico; microbiológico; radiológico

Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023b) e Correa (2020).

Na comunidade Cantinho, estão dispostos seis reservatórios públicos para armazenamento e distribuição da água captada pelos poços, como pode ser verificado no mapa da Figura 12. Não existem informações concretas quanto ao período em que foram construídos, frequência de manutenções ou limpezas. Em casos de ausência de limpeza dos reservatórios, pode-se proporcionar um ambiente favorável à proliferação de microrganismos patogênicos. A adoção de práticas de limpezas de reservatórios públicos e a criação de políticas de prática de higiene nos reservatórios deve ser realizada pelo poder público responsável pela gestão do abastecimento de água (Araújo Jr; Boni, 2023; Souza; Santos, 2019).

Figura 12 – Mapa das soluções alternativas coletivas de Cantinho

Fonte: Autoria própria (2024).

Dos seis reservatórios dispostos na comunidade, três foram construídos em plástico com reforço de fibra de vidro (PRFV) e três em manilhas de concreto armado. Nas visitas técnicas, foi verificado a presença de diversos problemas estruturais como fissuras, rachaduras, armadura exposta, entre outros, como pode ser notado na Figura 13.

Não havia registros de quando tinham sido feitas as últimas manutenções e limpezas nos reservatórios da comunidade. As iniciativas de manutenção ocorre por parte da população, que as realizavam de forma esporádica ao perceberem um local com vazamento ou armaduras expostas. Similarmente as manutenções, as limpezas são realizadas pela população quando identificam uma grande alteração nas características organolépticas da água.

Figura 13 – Estado de conservação das estruturas de reservação – Cantinho



Fonte: PSA/UFCG (2023b).

Como não há restrição ao acesso de todos os reservatórios, há a possibilidade de ações de vandalismo nas estruturas e na água distribuída. Além disso, os animais transitam nas proximidades de forma recorrente, podendo haver a presença de fezes e contaminação da água distribuída.

As problemáticas relatadas na reservação da água de Cantinho podem comprometer a potabilidade, a aceitabilidade e a disponibilidade da água distribuída. Desse modo, o diagnóstico permitiu a identificação dos eventos perigosos apresentados no Quadro 10.

Quadro 12 – Eventos perigosos identificados na reservação – Cantinho

Código	Evento perigoso	Perigo
R.1	Presença de fezes de animais na tampa do reservatório	microbiológico; químico
R.2	Inundação da válvula por águas superficiais	microbiológico; físico
R.3	Desprendimento de biofilme	microbiológico; químico; físico
R.4	Drenagem insuficiente e acúmulo de água	microbiológico; físico
R.5	Conservação inadequada de reservatórios/reservatórios danificados	microbiológico; físico; quantitativo

Quadro 10 – Eventos perigosos identificados na reservação – Cantinho (continuação)

Código	Evento perigoso	Perigo
R.6	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	químico; físico; microbiológico; quantitativo
R.7	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	químico; físico; microbiológico
R.8	Infiltração/vazamento de água	microbiológico; físico; quantitativo
R.9	Acesso de animais ao reservatório	microbiológico; químico
R.10	Construção inadequada do reservatório	microbiológico; físico; quantitativo
R.11	Presença de algas	microbiológico; químico; físico

Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023b) e Correa (2020).

Ao observar as estruturas das SAC presentes na Figura 13, na comunidade Cantinho não existe rede de distribuição com hidrômetros instalados, as ligações existentes foram realizadas de forma direta com mangueiras (polietileno), por meio de furos nos chafarizes. Segundo dados coletados nas visitas de campo, aproximadamente 190 habitações estão ligadas às SAC, o restante da população (130 domicílios) precisa utilizar poço privado ou se deslocar para ter acesso a água. Essa forma de distribuição apresenta riscos à qualidade da água, principalmente no processo de instalação das tubulações, pois a ausência de higienização no processo e vedação nos furos, permite o contato da água com possíveis contaminantes (PSA/UFCG, 2023b).

Como a distribuição de água em Cantinho é limitada às ligações individuais realizadas pelos usuários, é importante avaliar na análise de riscos os problemas associados à coleta e manuseio da água (Quadro 11). Em programas governamentais, as comunidades que recebem soluções alternativas de água necessitam de ações de sensibilização para o manuseio sanitariamente adequado da água (Almeida; Sobrinho, 2020).

Quadro 13 – Eventos perigosos identificados na coleta e manuseio da água – Cantinho

Código	Evento perigoso	Perigo
U.1	Coleta com recipiente inadequado, danificado ou sujo	microbiológico; químico; físico
U.2	Contaminação da água durante manipulação da água, por falta de higiene humana e animal	microbiológico
U.3	Torneira ou acessórios inadequados ou contaminados	microbiológico
U.4	Presença de fossa rudimentar ou local de defecação a menos de 30 metros	microbiológico; químico

Quadro 11 – Eventos perigosos identificados na coleta e manuseio da água – Cantinho (continuação)

Código	Evento perigoso	Perigo
U.5	Utilização de recipientes oriundos de armazenamento de produtos químicos para armazenar ou beber a água	químico; físico
U.6	Uso de recipiente para coleta que água que também é utilizado para outros fins (materiais potencialmente poluidores)	microbiológico; químico
U.7	Vazamento na torneira	quantitativo
U.8	Utilização de recipiente sem tampa	microbiológico; físico
U.9	Acesso de animais domésticos ao local de armazenamento de água	microbiológico; físico
U.10	Utilização de recipientes sujos para armazenamento de água	microbiológico; físico; químico
U.11	Manipulação da água sem higiene adequada	microbiológico; físico; químico
U.12	Armazenamento em recipiente sem tampa e/ou danificados	microbiológico; físico
U.13	Ambiente sujo próximo ao local de armazenamento e/ou armazenamento próximo ao solo	microbiológico
U.14	Estagnação da água devido ao baixo consumo, distribuição intermitente ou longos períodos sem uso	microbiológico; físico
U.15	Filtração com panos ou equipamentos sujos	microbiológico
U.16	Utilização de copos ou recipientes sujos para consumir água	microbiológico

Fonte: Adaptado de PSA/UFCG (2023b) e Correa (2020).

4.2 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

4.2.1 Descrição dos termos linguísticos

O Quadro 12 apresenta as descrições dos termos linguísticos decidida nas sessões de grupos focais realizadas. Como exemplo, estes consideraram como improvável aqueles eventos perigosos em que não houve registros de ocorrência no passado e que sejam muito improvável que ocorra novamente no futuro.

Quadro 14 – Termos linguísticos da probabilidade da ocorrência de eventos perigosos

Ocorrência	Descrição dos termos linguísticos
Improvável (I)	Não há registros de ocorrência e é muito improvável que isso vai acontecer no futuro
Pouco provável (PP)	Não há registros de ocorrência e há baixa probabilidade de acontecer no futuro
Provável (P)	É possível e sob certas circunstâncias pode acontecer
Muito provável (MP)	Já ocorreu no passado e tem potencial para acontecer novamente
Extremamente provável (EP)	Já ocorreu no passado e pode acontecer de forma recorrente

Fonte: Adaptado de WHO (2023).

Termos como "improvável", "provável" e "muito provável" são comumente utilizados para descrever a severidade, a ocorrência e a capacidade de detecção de eventos perigosos em avaliações pelo FMEA. Embora esses termos sejam intuitivamente compreensíveis, sua interpretação pode variar significativamente entre diferentes avaliadores. Essa variação pode resultar em avaliações inconsistentes e não comparáveis, dificultando a priorização e a gestão eficaz dos riscos.

No que tange a avaliação de riscos em PSA, o Ministério da Saúde (2012) indicou a escala de probabilidade com frequência temporal (diária, semanal, mensal ou anual) na avaliação de SAA urbanos. Já para avaliação de sistemas de abastecimento de água rural no Irã, Naseri *et al.* (2022) consideraram a frequência de erros em que o evento perigoso acontece em uma certa quantidade de casos, por exemplo um evento improvável é quando este ocorre uma vez em cada 10.000 casos.

Entretanto, estes tipos de avaliação podem ser complexas de se realizarem nas áreas rurais, como no caso do SAA Lagoa dos Encantos e SAC de Cantinho. Se nessas localidades não houver o hábito de registro a frequência de eventos perigosos na operação, a análise de risco pode ser comprometida (FRANÇA *et al.*, 2023a). As descrições escolhidas pelo grupo focal não consideram a frequência de ocorrência do evento perigoso no passado como Naseri *et al.* (2022), devido a ausência de informações para as comunidades estudadas.

Nos grupos focais para descrição dos termos linguísticos, os especialistas preferiram utilizar como base para construção da escala de probabilidade de ocorrência desse modelo o sugerido no Manual para Planos de Segurança da Água (2023a) da OMS. O Manual caracteriza os eventos a partir de análise qualitativa de ocorrência destes no passado. Além disso, sugere avaliar a probabilidade de ocorrência do evento no futuro, baseado na experiência dos operadores e de quem estiver realizando a avaliação, como descrito no Quadro 12.

De forma análoga às descrições realizada para a escala de probabilidade, foram descritos os termos linguísticos da severidade (Quadro 13) com base no impacto dos eventos perigosos na qualidade, aceitabilidade e quantidade de água disponíveis, bem como os efeitos potenciais destes à saúde pública. Qualquer falha que comprometa a qualidade da água pode ter consequências diretas e severas para a saúde pública, incluindo o aumento de doenças transmitidas pela água (Lacerda *et al.*, 2024; WHO, 2023a).

Quadro 15 – Termos linguísticos da severidade das consequências dos eventos perigosos

Severidade	Descrição dos termos linguísticos
Pouco severo (PS)	Impacto pouco significativo na qualidade, aceitabilidade ou quantidade da água
Medianamente severo (MS)	Não conformidade localizada, que afete a quantidade ou gere problema de aceitabilidade da água (não relacionado à saúde)
Severo (S)	*Não conformidade abrangente que afete a quantidade de água * Não conformidade abrangente que gere problema de aceitabilidade de água *Efeitos potenciais na saúde a longo prazo
Muito severo (MTS)	Efeitos potenciais na saúde a médio prazo
Extremamente severo (ES)	Efeitos potenciais na saúde a curto prazo ou risco elevado de morte

Fonte: Adaptado de WHO (2023).

Considerar os efeitos adversos à saúde contribui na tomada de decisões mais assertivas para ações de mitigação de riscos no SAA. Naseri *et al.* (2022) utilizaram avaliação dos danos causados ao usuário devido ao consumo da água, desde a possibilidade de lesão e perdas de funções corporais à necessidade de intervenção e cuidados ao consumidor. Estas descrições não se encaixam na realidade das áreas estudadas, pois a área abastecida por sistemas rurais são pequenas, com caos de doença exponenciais.

Os especialistas indicaram a adoção de avaliação dos efeitos potenciais a saúde de maneira subjetiva, considerando curto, médio e longo prazo potencial (Quadro 13). Haider *et al.* (2021) utilizaram descrições semelhantes na avaliação de comunidades da Arábia Saudita, obtendo priorização de risco efetiva para a área estudada.

Além disso, alterações de aparência, gosto e odor podem afetar a aceitabilidade da água pelos usuários, comprometendo o abastecimento público. Essa rejeição pode ocorrer mesmo que as alterações dos parâmetros organolépticos não afetem diretamente a potabilidade da água (Zini, 2021). Foram adicionadas nos termos linguísticos Severo e Medianamente Severo descrições acerca da aceitabilidade da água, quando houver não conformidades abrangentes que afetem apenas a aceitabilidade da água pela população.

Quanto à detecção, os especialistas concluíram que a detectabilidade dos eventos perigosos está totalmente associada à realização de inspeções técnicas, físicas ou de qualidade da água. Por isso, buscou-se adaptar descrições que indicassem as chances de detectar a problemática à cada termo linguístico, como as utilizadas por Bowles e Paláez (1995) e Haider *et al.* (2021).

O Quadro 14 apresenta as descrições selecionadas pelo grupo de especialistas, a partir

da efetividade das inspeções a serem realizadas no sistema, considerando a capacidade destas em detectar o problema (evento perigoso) no SAA ou SAC. Por exemplo, quando a capacidade de detecção é muito alta, uma inspeção com certeza pode detectar o problema.

Quadro 16 – Termos linguísticos da detecção dos eventos perigosos

Detecção	Descrição dos termos linguísticos
Muito Alta (MA)	Inspeções com certeza podem detectar o problema
Alta (A)	Inspeções tem boas chances de detectar o problema
Moderada (M)	Inspeções talvez identifiquem o problema
Baixa (B)	Inspeções provavelmente não irão detectar o problema
Sem detecção (SD)	Inspeções não conseguem detectar o problema

Fonte: Adaptado de Bowles e Paláez (1995) e Haider *et al.* (2021).

4.2.2 Funções de pertinência

Na segunda consulta aos especialistas, realizada por meio do formulário que consta no Apêndice A, foi possível delinear as funções de pertinência para cada termo linguístico das variáveis de ocorrência, severidade e detecção, conforme Tabela 3. O domínio para estas variáveis foi de [1, 10], obtendo-se uma predominância de funções triangulares (TMF). Salienta-se que para o RCI, o resultado, obtido a partir dos percentis, foi apresentado em funções trapezoidais.

Tabela 3 – Domínios dos termos linguísticos

SIF	Variável	Termo linguístico	Tipo	Função de pertinência	Saída
1	Ocorrência	Improvável	Triangular	(1, 1, 3)	RCI
		Pouco provável	Triangular	(1, 3, 5)	
		Provável	Trapezoidal	(3, 5, 6, 8)	
		Muito provável	Triangular	(6, 8, 10)	
		Extremamente provável	Triangular	(8, 10, 10)	
	Severidade	Pouco severo	Triangular	(1, 1, 3)	
		Medianamente severo	Triangular	(1, 3, 5)	
		Severo	Triangular	(3, 5, 7)	
		Muito severo	Trapezoidal	(5, 7, 8, 9)	
		Extremamente severo	Trapezoidal	(8, 9, 10, 10)	
2	RCI	Muito baixo	Trapezoidal	(1, 1, 9.25, 17.5)	FRPN
		Baixo	Trapezoidal	(9.25, 17.5, 34, 42.25)	
		Médio	Trapezoidal	(34, 42.25, 58.75, 67)	
		Alto	Trapezoidal	(58.75, 67, 83.5, 91.75)	
		Muito alto	Trapezoidal	(83.5, 91.75, 100, 100)	
	Detecção	Muito Alta	Triangular	(1, 1, 3)	
		Alta	Triangular	(1, 3, 5)	
		Moderada	Triangular	(3, 5, 7)	
		Baixa	Triangular	(5, 7, 9)	
		Sem detecção	Trapezoidal	(7, 9, 10, 10)	

Fonte: Autoria própria (2024).

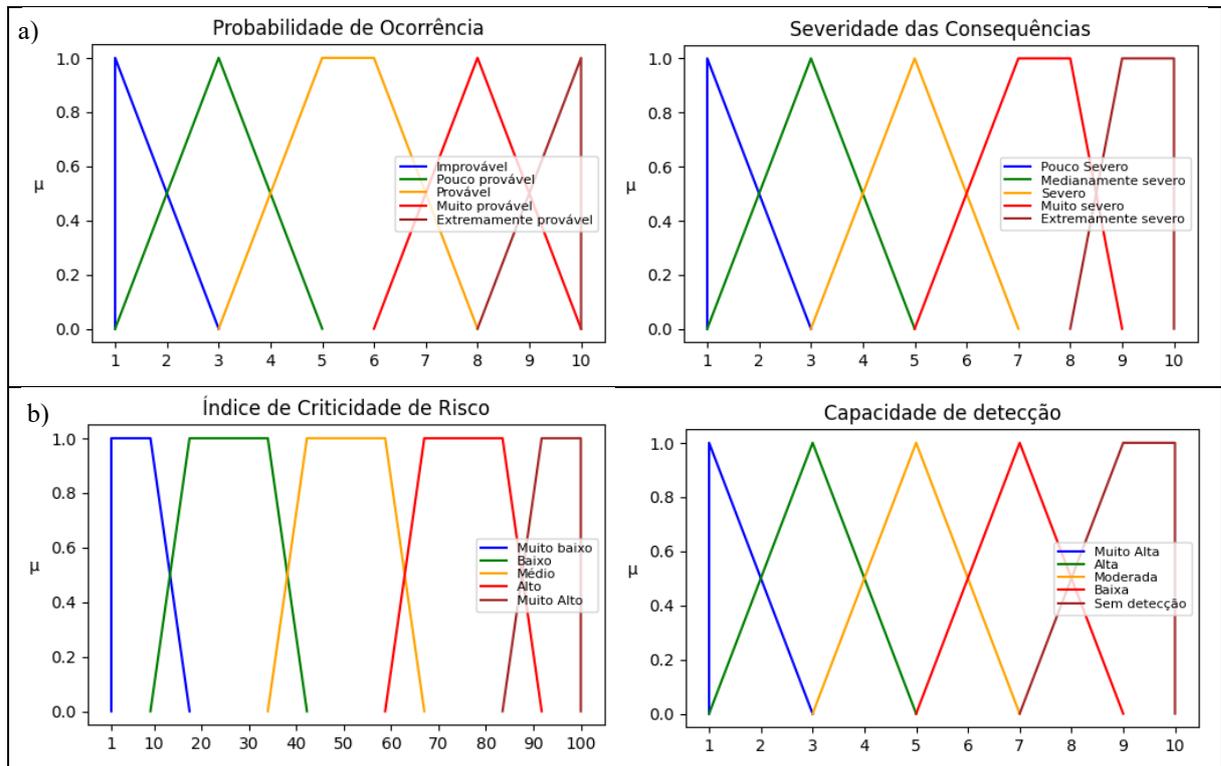
As TMF e TMRF são amplamente utilizadas em sistemas Fuzzy que visam reduzir a imprecisão de resposta dos especialistas. Neste trabalho, foram definidas por poucos parâmetros, reduzindo a complexidade computacional e a implementação nos SIF. Como pode ser observado na Figura 14, ainda são intuitivas e permitem uma representação clara e direta dos graus de pertinência, se comportando de maneira similar à trabalhos que utilizaram a lógica *fuzzy* para análises variadas de sistemas de abastecimento de água (Moorthi; Singh; Agnivesh, 2018; Pedrycz; Gomide, 1998; Zahan; Nasrin, 2021; Haider *et al.*, 2021).

Ressalta-se que, a fim de estabelecer de maneira fixa o comportamento diretamente proporcional no segundo SIF, em que os valores de saída do FRPN aumentam à medida que os valores de entrada da detecção e do RCI aumentam, utilizou-se os termos linguísticos para a detecção de forma inversa. Ao se observar a Tabela 3, percebe-se que uma capacidade de detecção “muito alta” possui os menores valores possíveis da função de pertinência, já que esta pode reduzir o risco associado aos eventos perigosos.

Essas funções também oferecem flexibilidade ao se modelar uma ampla variedade de situações práticas, o que facilita a combinação das opiniões divergentes de especialistas, minimizando as discrepâncias individuais. Na realidade de PSA, Haider *et al.* (2021) utilizou funções trapezoidais iguais para as três variáveis e indicou que a abordagem tratou efetivamente das incertezas associadas a limitação de dados e imprecisão das respostas dos especialistas.

Como consequência das respostas dos especialistas, obteve-se funções de pertinência diferentes para cada uma das variáveis de entrada. Essa abordagem agrega e complementa análises similares à de Haider *et al.* (2021) aplicadas em PSA, uma vez que permite a personalização das funções para a realidade de cada variável de entrada com diferentes características de incerteza. Além disso, podem melhorar a capacidade de discriminação entre eventos perigosos com níveis de risco semelhantes, mas que podem ter impactos significativamente diferentes.

Figura 14 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do primeiro (a) e segundo (b) SIF



Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 14, pode-se perceber que o eixo y (μ) indica a pertinência de um valor de entrada ao termo linguístico. Ao se observar as funções triangulares, nota-se 100% de pertinência em apenas um ponto. Como exemplo o termo linguístico “improvável” (Figura 14a) da probabilidade de ocorrência, em que os especialistas concordaram que um evento perigoso só pertence 100% à esta classificação quando o seu valor de entrada é três. No intervalo de um a três, os valores de entrada variam o grau de pertinência de forma crescente (zero a 100%) para este caso, e de forma decrescente quando variam de três a cinco.

Nota-se que na região de três a cinco ocorre a interseção entre duas funções de pertinência dos termos linguísticos “Improvável” e “Provável”, considerada como região de incerteza. Logo, na ativação das regras para o SIF, os valores de entrada podem apresentar grau de pertinência variáveis a um ou mais termos linguísticos (Ferreira, 2023).

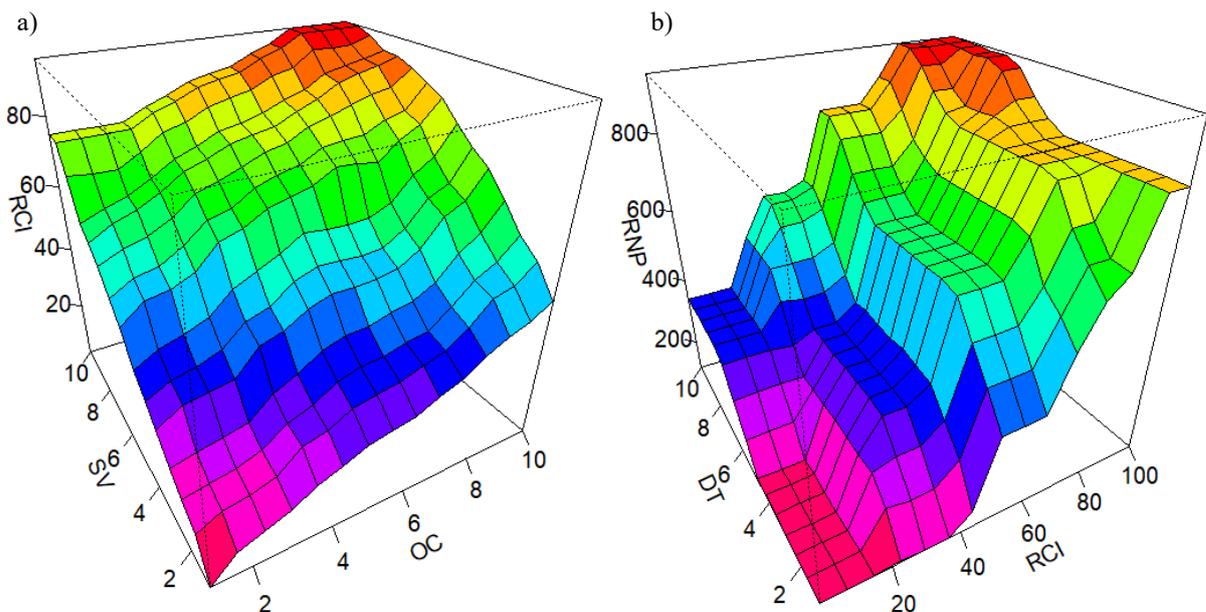
Ao se observar o RCI (Figura 14b), é nítido que as regiões de certeza para cada termo linguístico são maiores, devido a utilização de funções trapezoidais. No caso do termo linguístico “Alto”, os valores de entrada possuem 100% de pertinência quando pertencentes ao intervalo de 67 a 83.5. Da mesma maneira que nas TMF, a região entre 83.5 e 91.75 apresenta

incertezas da pertinência dos valores de entrada entre os termos linguísticos “Alto” e “Muito alto”, que podem variar de zero a 100%.

4.2.3 Gráfico de superfície da base de regras

Após a incorporação das funções de pertinência nos SIF, associado às bases de regras estabelecidas no Quadro 4 para o RCI e Quadro 5 para o FRPN, foi possível construir o gráfico de superfície para cada uma das saídas (Figura 15). O gráfico possibilita a avaliação de como a combinação das duas variáveis de entrada afeta a saída do SIF, bem como a identificação de tendências específicas no comportamento do sistema. Pode, ainda, verificar se a percepção dos especialistas condiz com o comportamento esperado em situações reais (Ferreira, 2023; Teixeira, 2022).

Figura 15 – Gráfico de superfície do primeiro (a) e segundo (b) SIF



Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 15a, o gráfico mostra como diferentes valores de probabilidade de ocorrência (OC) e severidade das consequências (SV) afetam o nível do RCI. A superfície indica um **aumento gradual do risco** à medida que as entradas aumentam, indicando que o sistema **responde às mudanças nas entradas de forma contínua**, sem saltos abruptos. É possível perceber que as regras do primeiro conjunto *Fuzzy*, funcionam conforme o esperado, com transições suaves entre os diferentes níveis de risco.

Nesta associação, há uma influência ligeiramente maior da severidade, se comparado a ocorrência, percebido através do maior grau de inclinação, quando se considera os valores de

entrada da ocorrência estáticos. Os eventos podem atingir níveis de saída da ordem de 75, em situações que a consequência é extremamente severa, mesmo que a ocorrência seja improvável.

Isso se dá, pois, a severidade de um evento de risco está diretamente relacional ao potencial de causar danos significativos à saúde humana. Mesmo que os eventos sejam raros, a alta severidade pode afetar muitas pessoas, como por exemplo a contaminação por patógenos ou excesso de substâncias químicas. Algumas regulamentações e diretrizes de segurança da água priorizam a mitigação de riscos com base na severidade, de modo a garantir que a segurança do consumo da água fornecida. Prevenir os eventos com alta severidade pode também garantir que os SAA e SAC não sejam comprometidos em momentos críticos (Pundir *et al.*, 2021; String; Lantegne, 2016; Van Den Berg *et al.*, 2019).

O gráfico de superfície do segundo SIF (Figura 15b) apresenta um comportamento escalonado e crescente, com variações abruptas nos valores de saída. Determinadas combinações do RCI e da detecção podem ser estáveis em algumas regiões, como no caso da área em que o RCI varia de um a 20 e a detecção varia de um a cinco, que o valor de saída do FRPN é mínimo. Entretanto, quando sofrem pequenas variações resultam em alterações significativas nos níveis de risco, como pode ser visto ao se variar os valores de entrada do RCI de 20 a 30.

As variáveis de entrada interagem de maneira complexa e não linear, o que aumenta a sensibilidade do modelo nas regiões com alta inclinação da superfície. Ivancan e Lisjak (2021) avaliaram modelos de entrada similares ao obtido para o segundo SIF e indicaram que este tipo de configuração são relevantes para pequenas alterações nos parâmetros de entrada. No caso do PSA, estas variações acontecem principalmente nos valores do RCI, que saem do primeiro SIF com valores próximos entre os eventos perigosos. A configuração escalonada pode indicar características significativas de resposta para eventos perigosos que poderiam ser mascarados pela metodologia tradicional.

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO NO PSA

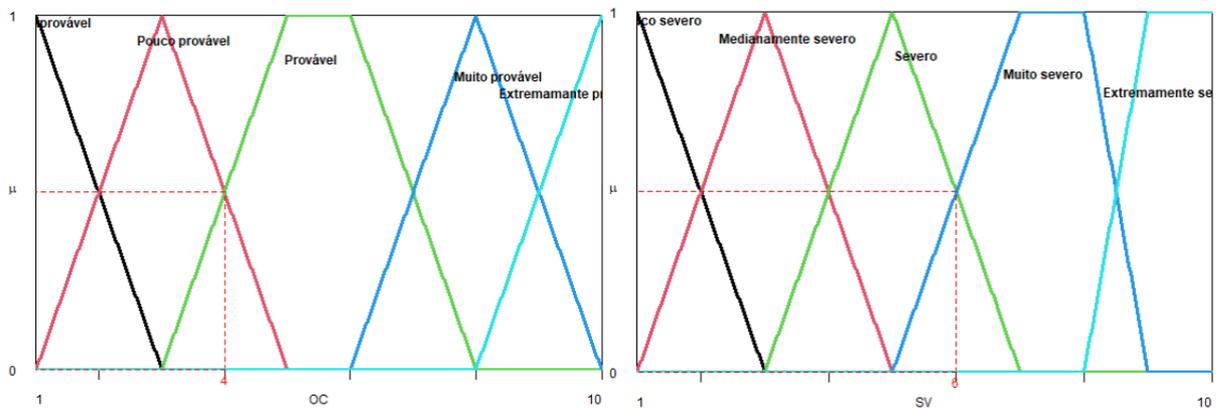
A partir da segunda consulta aos especialistas, foi possível definir os termos linguísticos para cada evento perigoso identificado na realidade do SAA Lagoa dos Encantos e as SAC de Cantinho, conforme tópicos 4.1.1 e 4.1.2. Tomando como exemplo o evento “Entupimentos e/ou assoreamentos na área de captação” para o SAA Lagoa dos Encantos que, na avaliação de risco, os especialistas o classificaram como “severo”. Isso se deu a partir do consenso de que

este evento pode apresentar um comprometimento parcial da disponibilidade de água no sistema.

Para a escala de ocorrência, o classificaram como “pouco provável”, pois não existem registros de ocorrência no passado e, devido as manutenções frequentes realizadas na captação de água da localidade, há baixa probabilidade deste ocorrer no futuro (PSA/UFCG, 2023a).

Na aplicação das entradas no SIF de primeiro nível, a partir dos valores estabelecidos no Quadro 3, o termo linguístico escolhido para a ocorrência assume o valor “4” e o da severidade assume o valor “6”, como pode ser visualizado na Figura 16, com graus de pertinência de 50% para as duas variáveis.

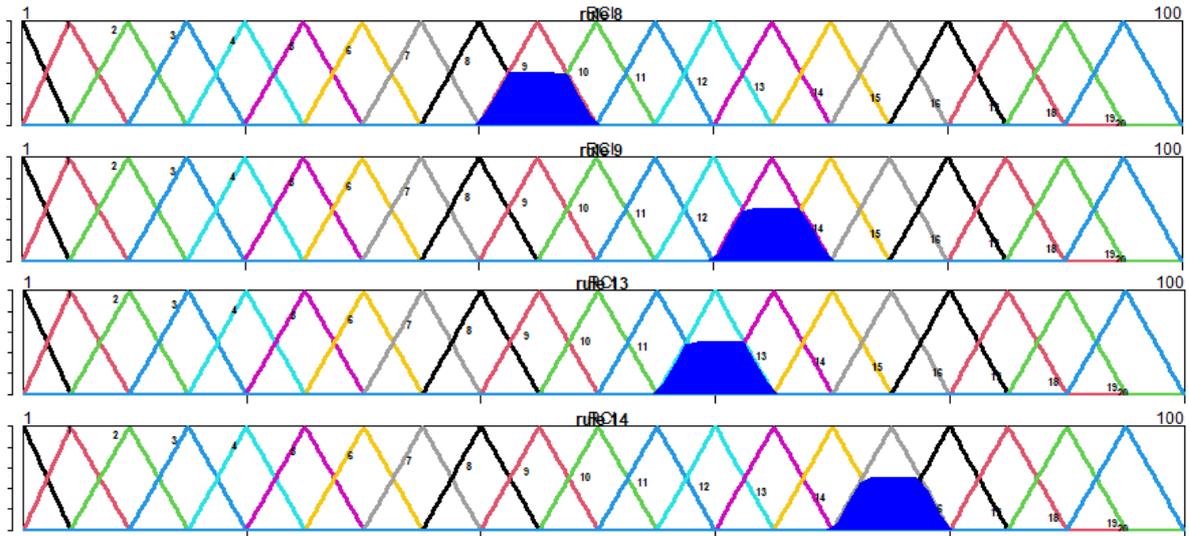
Figura 16 – Funções de pertinência ativadas para a Ocorrência e Severidade



Fonte: Autoria própria (2024).

Esses valores de entrada foram submetidos a testagem na base de regras definidas no Quadro 4, o teste ativou as regras quatro regras, conforme a Figura 17. A regra oito infere que um evento pouco provável e severo tem como saída o RCI médio. Já a regra nove indica que um evento perigoso com entradas pouco provável e muito severo, possui o RCI alto. A regra treze avalia um evento provável e muito severo com saída de RCI alto. Por fim, a regra quatorze, que possui como entrada os termos linguísticos provável e extremamente severo, inferiu o RCI como muito alto.

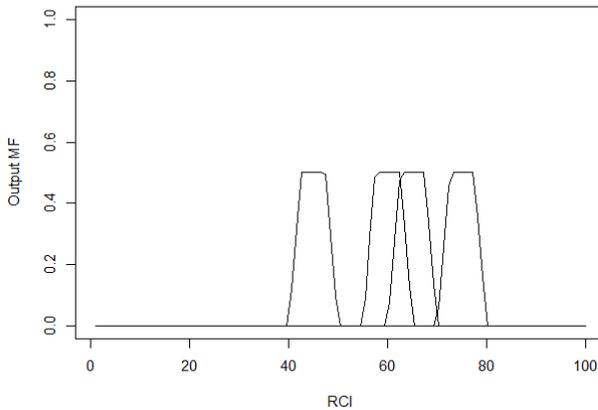
Figura 17 – Regras ativadas para entupimentos e/ou assoreamentos na área de captação



Fonte: Autoria própria (2024).

As áreas inferiores aos pontos de inferência das funções de pertinência nos conjuntos de saída são separadas e agrupadas conforme a Figura 18. Nota-se que o valor de RCI de 61.09 é obtido para o evento de entupimentos e/ou assoreamentos na área de captação, a partir do cálculo do centro de gravidade de área (equação 3).

Figura 18 – Centro de gravidade de área para as regras ativadas



Fonte: Autoria própria (2024).

O valor obtido para o RCI foi normalizado e submetido ao SIF de segundo nível associado à detecção. Neste caso, os especialistas classificaram como moderado, uma vez que inspeções na área de captação talvez identifiquem o problema de entupimentos. Essa identificação pode subsidiar a realização de ações efetivas para evitar um possível comprometimento da funcionalidade do sistema. O valor de saída do FRPN obtido foi de 503,09, classificando este evento perigoso na escala de risco final como moderada-alta.

Este processo foi repetido para todos os eventos perigosos, tanto do SAA Lagoa dos Encantos, como nas SAC de Cantinho, e estão apresentados nos Apêndices B e C.

4.3.1 SAA Lagoa dos Encantos

Na priorização de risco do SAA Lagoa dos Encantos, foi possível avaliar 58 eventos perigosos, destes 5,2% foram classificados como muito alto, 48,3% como alto risco, 27,6% como moderado-alto, 8,6% como moderado-baixo e 10,3% como baixo. Percebeu-se que os eventos perigosos riscos classificados como muito alto (Falta de monitoramento de qualidade da água na distribuição; Interrupção do fornecimento de produtos químicos por parte do prestador; Falta de controle na quantidade de produto químico e dosagem) pertencem às etapas de distribuição e tratamento e podem influir diretamente na qualidade da água distribuída à população.

Estas etapas, geralmente, possuem alta prioridade na execução de ações mitigadoras devido ao papel central na eliminação de contaminantes e garantia da conformidade da água nos padrões de potabilidade. Além disso, qualquer falha na rede pode comprometer a distribuição de água segura devido a possibilidade de recontaminação, aumentando o risco de distribuição de água contaminada. Essas falhas devem ser mitigadas com maior urgência, através de ações de curto, médio e longo prazo, estabelecidas na etapa de planejamento de melhorias do PSA (Muio *et al.*, 2019).

A falta de monitoramento da qualidade de água na rede de distribuição foi classificado com FRPN de 1000, obtido por possuir pontuação máxima em todos as variáveis de entrada (ocorrência, severidade e detecção). França *et al.* (2023b) identificou que, em 2022, o Sisar BBJ realizou análises de qualidade da água apenas na saída do tratamento do SAA Lagoa dos Encantos. Os especialistas julgaram a ausência de análise na rede de distribuição como extremamente severa, podendo trazer riscos à saúde da população, já que a garantia do cloro residual livre até as pontas de rede não é efetiva.

Ao se utilizar FMEA para avaliar redes de distribuição em sistemas de abastecimento de água rural no Irã, Naseri *et al.* (2022) identificaram o evento perigoso de ausência de cloro na rede de distribuição. A problemática foi atribuída à ausência de monitoramento da qualidade de água associada às falhas na etapa de tratamento da água. Fatos semelhantes foram identificados em sete comunidades rurais de Aracati/CE por França *et al.* (2023b). O cloro

residual livre abaixo dos VMP estabelecidos na portaria de potabilidade pode indicar a necessidade de monitoramento contínuo nas áreas rurais.

No tratamento, a interrupção de fornecimento e a falta de controle na dosagem de produtos químicos, que possuíram FRPN de 998,87 e 873,92, respectivamente, podem comprometer a potabilidade da água, já que esta etapa é responsável pela remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos da água bruta. Ventura, Vaz Filho e Nascimento (2019) identificaram eventos perigosos na ETA de Guaraú, São Paulo, associados à dosagem inadequada de coagulantes utilizados para a geração de flocos na decantação, tendo como consequência alterações na turbidez da água.

Essas consequências podem acometer também o SAA Lagoa dos Encantos, interferindo na efetividade da desinfecção, devido a presença de partículas suspensas que protegem os microrganismos da ação desinfetante. No SAA Lagoa dos Encantos, que possui gestão compartilhada, a dosagem destes produtos é realizada por operador local. Raid *et al.* (2022) concluíram que a gestão compartilhada é uma das modalidades de prestação de serviço mais adequadas ao contexto rural, entretanto há a necessidade de gestão técnica para efetividade das etapas do sistema.

Assim, a promoção de estoque de produtos químicos utilizados no tratamento pela equipe de gestão do Sisar, bem como o treinamento dos operadores para utilização correta dos instrumentos e dosagem dos produtos podem contribuir na mitigação de risco destes eventos perigosos (PSA/UFCG, 2023a).

Naseri *et al.* (2022) obtiveram, ainda, um alto risco para situações de tubulações danificadas na rede de distribuição, o que corrobora com a classificação do evento de “Contaminação da água por meio de tubulações danificadas” com alto FRPN (848,63) obtida neste trabalho. Ações de substituição das tubulações antigas e desgastadas por tubulações de maior resistência ao impacto associadas ao aumento da profundidade de instalação destas podem contribuir na redução do grau de risco e garantia da segurança da água à população (Naseri *et al.*, 2022; PSA/UFCG, 2023a).

Dos eventos perigosos classificados com alto risco, 60,7% são da etapa de captação indicando um ponto de atenção no sistema. A captação superficial pode sofrer influência de intempéries e eventos climáticos extremos que inviabilizem a captação, como chuvas intensas com elevação da turbidez (848,63), ocorrência de secas (848,63) e de cheias ou inundações

(700,50). Esses eventos perigosos podem impactar negativamente na qualidade da água, alterando seu enquadramento de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005 e impossibilitando o uso para consumo humano.

Além disso, ações antrópicas também podem afetar a efetividade do serviço. A utilização de agrotóxicos em torno da fonte de captação (848,63) foi uma realidade encontrada em toda região atendida pelo sistema, principalmente nas áreas com cultivos do caju e da mandioca, plantadas em grande escala na região. Sousa *et al.* (2023) corroboram com o risco calculado, pois concluíram que na região da sub-bacia do Baixo Jaguaribe houve um avanço de ações antrópicas nas áreas de coberturas naturais para o cultivo de plantações particulares, com um incremento de 809,3% de área entre 1985 e 2021, afetando diretamente na qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos locais.

Ainda decorrente de ações antrópicas, foram classificados como alto risco, a presença de fossas rudimentares a montante (848,63), o lançamento de efluentes em torno da fonte (839,68) e a existência de outras fontes de contaminação em torno da fonte (839,68). Apesar de não ser diretamente consumida pela população, a água contaminada por estes eventos perigosos podem demandar de etapas mais complexas na ETA Lagoa dos Encantos, com consequente impacto financeiro na garantia da potabilidade da água distribuída.

Correa e Ventura (2020), avaliando eventos perigosos semelhantes com alto risco na área rural de São Carlos/SP, concluíram que assegurar que a área de captação esteja protegida de fontes poluidoras, pode contribuir na mitigação destes riscos, o que pode ser igualmente indicado para Lagoa dos Encantos. A proteção da área deve ser realizada em paralelo a conscientização da população e fiscalização destes tipos de atividades, que podem evitar o aumento do número de contribuições inadequadas em torno da fonte.

Apesar de possuir pouca probabilidade de ocorrência na região do SAA Lagoa dos Encantos, o evento perigoso de abate de animais próximo a área de captação (786,86) também foi classificado como alto risco. Isso se deu pois os especialistas concordaram que inspeções no SAA não conseguem detectar o problema, aumentando a possibilidade de recorrência deste.

Outro fator que impactou no risco do evento perigoso foi a possibilidade de contaminação do manancial, se houver descarte inadequado ou atividade clandestina. Baseado nessa hipótese, os especialistas avaliaram este evento perigoso como severo. Ao avaliar os impactos de matadores públicos em Morada Nova/CE, Rabelo *et al.* (2018) corroboram com os

especialistas que o lançamento inadequado de efluentes e resíduos de matadouros (restos de carne, cascos, vísceras não comestíveis etc.) contribui para alteração negativa na qualidade de água de águas superficiais.

Na reservação, a estagnação da água devido baixo consumo (786,85) e consequente acúmulo (764,07) e desprendimento (764,04) do biofilme gerado foram os eventos prioritários. Em condições de baixa movimentação, há um aumento na formação de biofilmes nas superfícies internas dos reservatórios, estes podem abrigar uma variedade de microrganismos, incluindo bactérias patogênicas, vírus e protozoários. Quando há desprendimento do biofilme, os patógenos podem ser liberados na água a ser consumida, gerando recontaminação, aumento da turbidez e alteração nas propriedades organolépticas. Além disso, podem dificultar na ação desinfetante do hipoclorito de sódio (Almeida *et al.*, 2019; Mendes; Sarmiento, 2022).

A principal ação realizada pelos operadores do sistema para evitar o aumento do risco associado a estes eventos perigosos é a limpeza periódica dos reservatórios. Medidas como a instalação de sensores automatizados podem contribuir no monitoramento da qualidade da água e tomada de decisões para mitigação dos riscos (PSA/UFCG, 2023a).

A Figura 19 apresenta um comparativo entre o ranking de priorização obtido para os eventos perigosos na metodologia sugerida pela OMS e na FRPN deste trabalho. Os números indicados nas laterais do gráfico indicam a ordem de priorização dos eventos perigosos em cada análise de risco (tradicional e FRPN). Cada evento perigoso é apresentado por meio dos códigos adotados no item 4.1, tanto no lado direito quanto no esquerdo. As linhas coloridas conectam as posições dos eventos perigosos na metodologia tradicional (eixo esquerdo) com os valores correspondentes no FRPN (eixo direito), indicando a variação da posição de priorização de risco destes. A inclinação da linha indica a magnitude e a direção da mudança na comparação das metodologias.

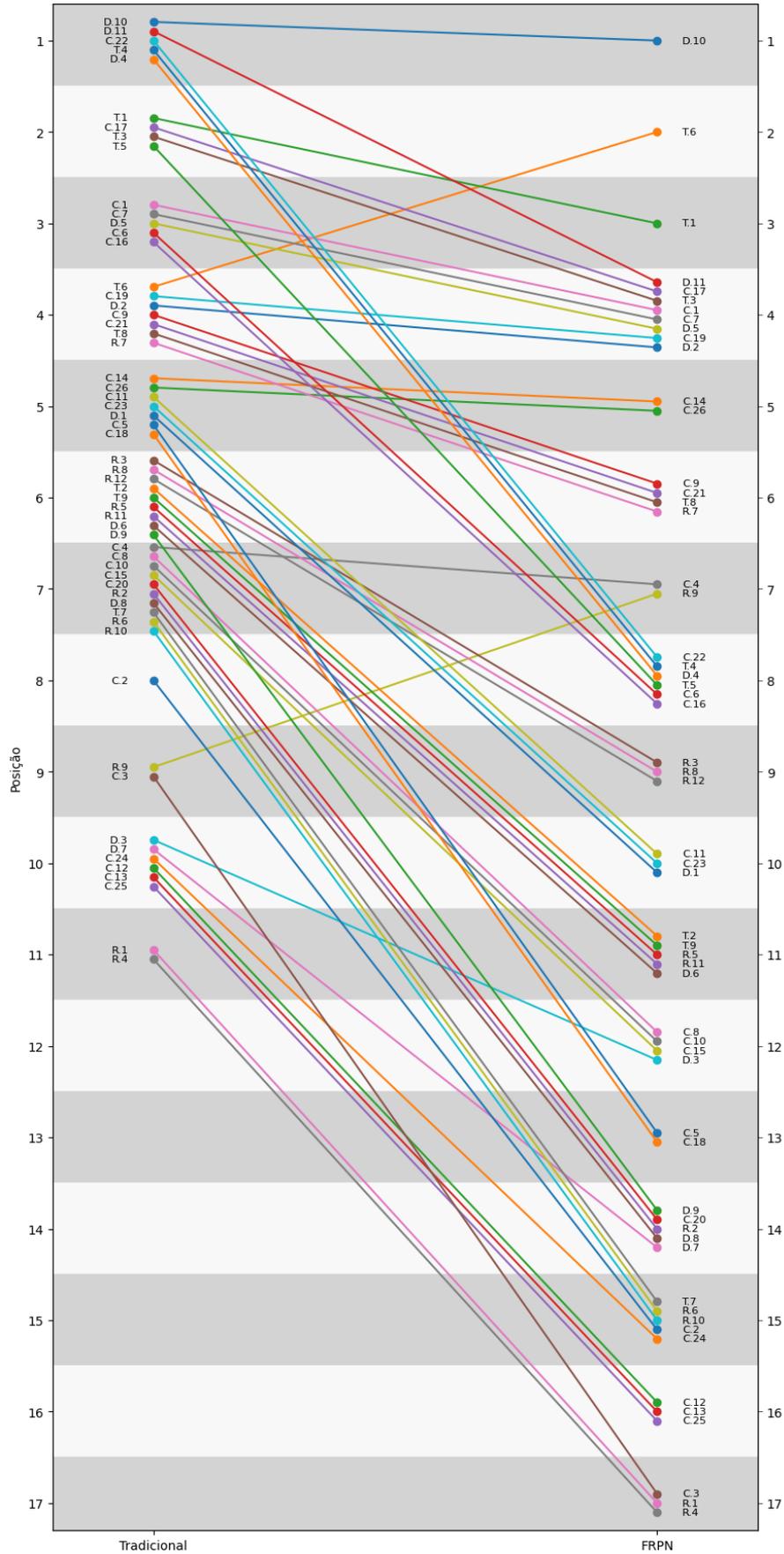
No gráfico, percebe-se que a metodologia sugerida neste trabalho aumenta a quantidade de níveis no *ranking* de priorização de risco de 11 para 17, reduzindo situações de empates principalmente nos níveis quatro a sete da metodologia tradicional. Isso se dá devido a incorporação da detecção nas avaliações já realizadas, além do *Fuzzy* ao FMEA. A vantagem da fuzzificação é que, ao permitir a adição da medida de imprecisão nas três variáveis de entrada, fornece aprimoramento em relação à ordem de priorização obtida, permitindo

ordenamento de ações de mitigação adequadas à realidade quando da tomada de decisão dos gestores do sistema (Balaraju; Raj; Murthy, 2019; Ribas *et al.*, 2019).

Devido ao aumento do *ranking* e, conseqüente, redução na quantidade de **desempates**, nota-se no *slope chart* que a maioria dos eventos perigosos do SAA Lagoa dos Encantos caíram de ranking, com destaque para os eventos C.5 (Falha elétrica) e C.18 (Falha mecânica e estrutural no sistema de captação) que caíram de 5º para 13º lugar na ordem de priorização de ações mitigadoras. Apesar de serem provável de acontecer, a realização de inspeções na área de captação e realização de testagens no sistema, podem facilmente detectar o problema, podendo solucioná-lo de maneira mais efetiva.

Os eventos C.14 (lançamento de efluentes domésticos ou industriais em torno da fonte) e C.26 (Existência de outra fonte de poluição até 10 metros da fonte) possuíam o mesmo valor de priorização de riscos do C.5 e C.18 na metodologia tradicional. Entretanto, na FRPN, estes continuaram na 5ª posição de prioridade, devido à dificuldade de identificá-los durante a realização de inspeções na área de captação pois o canal do trabalhador possui longa extensão, podendo receber contribuição de outras localidades.

Figura 19 – Slope chart comparativo entre a metodologia tradicional e a FRPN – Lagoas



Fonte: Autoria própria (2024).

Outra situação que a metodologia proposta soluciona é o fato de eventos como o R.5 (Reservatório de armazenamento está rachado, com vazamentos ou infiltração) e D.9 (Existência de ponto de furto de água), que na metodologia tradicional (Tabela 4) estavam empatados com um grau de risco de “8”, obtido do produto da ocorrência pela severidade, estarem em posições diferentes de prioridade na escala proposta pelo FRPN. Estes eventos, apesar de possuírem grau de detectabilidade similares (médio), possuem severidade e ocorrência diferentes.

Tabela 4 – Comparação dos eventos perigosos R.5 e D.9

Evento	SV	OC	DT	TRAD	FRPN
R.5	MTS	PP	M	8	696,89
D.9	MS	P	M	8	503,90

Fonte: Autoria própria (2024).

A metodologia tradicional utiliza apenas o produto da ocorrência pela severidade, sem pesos para cada variável de entrada, já o FRPN utiliza a base de regras para avaliar as variáveis de entrada, contornando situações de empate como a citada. Assim, os valores de saída dos eventos R.5 e D.9, os colocam em ordem de priorização de risco diferentes, 11° e 14°, respectivamente. Apesar disso, ambos os eventos continuaram classificados no mesmo grau de risco (moderado-alto) da escala apresentada na Tabela 1, que indica a necessidade de ações de mitigação em um prazo mais curto.

Salienta-se que, embora a aplicação de sistemas *fuzzy* à análise FMEA melhore significativamente a precisão e a objetividade na priorização de riscos, muitas situações empates em um mesmo nível de priorização ainda podem ser notadas na Figura 19, como na quarta e oitava posições. Ivancan e Lisjak (2021) ao analisarem a aplicação de sistema *Fuzzy* com quatro etapas no FMEA, concluíram que situações de empates podem ocorrer devido à dificuldade que o SIF obteve em diferenciar a prioridade de risco com base nas entradas fornecidas, como é o caso do modelo em estudo. Entretanto, esse problema não necessariamente está associado a uma falha no modelo, mas pode indicar limitações na capacidade de decisão deste.

Assim, eventos perigosos classificados numa mesma posição da ordem de priorização de risco possuem urgência similar nas ações mitigadoras. A decisão da prioridade de ações deve ser realizada pela equipe de gestão do sistema, de modo a incluir outros fatores relevantes para mitigação de risco como custos, tempo de realização, entre outros.

Na avaliação de risco, nem sempre as ações já realizadas pelo prestador de serviço coincide com o que a análise técnica identifica como prioritário. No caso do Sisar BBJ, alguns riscos identificados já possuíam ações mitigadoras, como o prazo de 24 horas para realização de manutenções, a adoção de equipamentos reservas para o sistema, proteção das estruturas para evitar o vandalismo, entre outras.

Entretanto, o prestador pode priorizar questões apenas baseado em experiências passadas ou a limitação de recursos financeiros, levando-o a focar em áreas que não correspondem necessariamente aos maiores riscos identificados tecnicamente. Por isso, a priorização proposta pelo modelo, que obtém mais detalhes na posição dos eventos perigosos, pode impactar de maneira significativa na gestão do SAA Lagoa dos Encantos.

4.3.2 SAC Cantinho

Nas soluções alternativas coletivas de abastecimento instaladas em Cantinho, avaliaram-se 52 eventos perigosos, sendo 11,5% classificados como muito alto, 44,3% como alto, 25,0% como moderado-alto, 7,7% como moderado-baixo e 11,5% como baixo. Foram classificados com muito alto risco eventos de todas as etapas das SAC, dando indícios de uma problemática generalizada na prestação do serviço.

Eventos relacionados ao manejo da água pelos usuários foram identificados como mais prioritários na avaliação de risco das SAC de Cantinho. Os eventos U.2 (Contaminação da água durante manipulação da água, por falta de higiene humana e animal) e U.5 (Utilização de recipientes oriundos de armazenamento de produtos químicos para armazenar ou beber a água) apresentaram FRPN de 1000,0 e 998,87, respectivamente.

Outros eventos perigosos associados ao manejo inadequado de água pelo usuário, como a manipulação da água sem higiene adequada (848,63), utilização de copos ou recipientes sujos para consumir (839,68) e armazenar a água (848,63), recipientes danificados ou sem tampas (839,68), foram classificados como alto risco. Isso ocorre porque, quando a água é coletada na SAC, as inspeções realizadas não identificam os problemas que podem ser causados pela negligência do consumidor.

Na análise de poços rasos da comunidade Camurupim - Aracati/CE, Costa e Lacerda Júnior (2023) identificaram problemas de qualidade de água nos poços de abastecimento humano semelhantes à Cantinho, que podem ocasionar problemas de saúde na população. Os autores indicaram a necessidade de ações preventivas tanto na captação quanto no manuseio da

água. Em áreas rurais, é comum que as práticas de higiene sejam menos rigorosas no manejo da água devido à falta de infraestrutura adequada e de informações acerca das medidas corretas do manuseio, o que possibilita a contaminação da água consumida. A falta de programas de capacitação e conscientização sobre a importância do manejo seguro da água pelos moradores contribui para a perpetuação de práticas inadequadas.

Por outro lado, a precariedade econômica limita o acesso a materiais e equipamentos necessários para a manutenção e proteção das fontes de água, agravando a situação. A combinação desses fatores cria um ambiente onde a negligência e a falta de higiene no manejo da água se tornam comuns, aumentando significativamente o risco de eventos perigosos.

No que se refere à utilização de embalagens de agrotóxicos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Federal nº 12.305/2010, estabelece que são obrigados a estruturar e implementar a logística reversa, distribuidores e comerciantes de agrotóxicos, incluindo seus resíduos e embalagens para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada. Entretanto, a ausência de logística reversa em Cantinho, implica na utilização dos recipientes de produtos químicos para atividades do dia a dia da população, incluindo o manuseio de água para consumo humano, que podem impactar diretamente na saúde destes (Brasil, 2010; PSA/UFCG, 2023b).

Diversos trabalhos identificaram a reutilização de embalagens de agrotóxicos por produtores rurais, indicando a ausência de conscientização sobre a necessidade de logística reversa e os perigos associados a reutilização de recipientes de produtos químicos, que podem conter substância incrustadas nas paredes mesmo após lavagem. Quando as comunidades não possuem abastecimento de água por rede de distribuição, como em Cantinho, a probabilidade de ocorrência deste tipo de contaminação é ainda mais alta, visto que há demanda de uso de recipientes para armazenar água nos domicílios (Aguiar; Paes; Silva, 2021; Boziki; Beroldt; Printes, 2011; Leal, 2023; Miranda; Oliveira, 2019; Silva; Alves, 2024; Souza *et al.*, 2018).

Os eventos T.1 (Falta de controle na quantidade de produto químico e dosagem) e T.3 (Inexistência de equipamentos para tratamento de água) ficaram empatados (990,17) em terceiro lugar na escala de priorização, mostrando a importância dada pelos especialistas ao tratamento de água na comunidade Cantinho. Como descrito no Tópico 4.1.2, as SAC não possuem ETA ou simples desinfecção, distribuindo água bruta para a população, o que implica em descumprimento da portaria de potabilidade.

Nas análises de qualidade da água, foram identificadas a presença de coliformes totais e *E. Coli* em todas as amostras de água bruta coletadas em Cantinho, França *et al.* (2023a) relataram que parte da população não utiliza essa água para beber e cozinhar, sendo utilizada apenas para demais atividades domésticas. Alguns moradores realizam a compra da água oriunda de um poço, localizado na comunidade Morrinhos, por acreditarem possuir melhor qualidade do que o distribuído na comunidade, apesar de também não existir tratamento na água de Morrinhos.

Com a ausência de equipamentos de tratamento de água nas SAC e no poço de Morrinhos, a água consumida diretamente dessas fontes pode conter micro-organismos patogênicos, como bactérias, vírus e protozoários, que são responsáveis por doenças gastrointestinais e outras infecções. Além disso, a falta de tratamento adequado pode resultar na presença de contaminantes químicos, como pesticidas e metais pesados, devido o uso de agrotóxicos nas proximidades dos poços, que têm efeitos adversos a longo prazo na saúde humana.

Apesar da alta eficácia das medidas domiciliares de tratamento de água identificadas por Jesus *et al.* (2023), a falta de controle na dosagem dos produtos utilizados pode impactar negativamente na saúde da população, seja pela subdosagem (786,50), levando ao consumo de água possivelmente contaminada por patógenos causadores de doenças, ou pela sobredosagem (786,85), causando contaminação química. Com a responsabilidade de tratar a água transferida aos consumidores, a probabilidade de detecção desses eventos perigosos por meio de inspeções é baixa, aumentando o seu valor de saída do FRPN.

Na reservação, o evento R.3 (desprendimento de biofilme) foi o que apresentou maior prioridade, classificado com risco muito alto pelo FRN de 990,17. Isso se deu devido a ausência de limpezas e manutenções frequentes no reservatório nas SAC de Cantinho, com consequente acúmulo de biomaterial no fundo e nas paredes do tanque. O crescimento das colônias e a competição entre os microrganismos dentro do biofilme pode levar ao desprendimento de placas na água, que foi validado a partir das análises de qualidade da água, realizadas durante o ano de 2023, indicando valores elevados de cor e turbidez na água dos chafarizes (Almeida *et al.*, 2019; Mendes; Sarmiento, 2022; PSA/UFCG, 2023b).

Ademais, a infiltração e vazamento de água nos reservatórios dos chafarizes, associados a perigos físicos e quantitativos, foram classificadas com alto risco (786,85), devido a

ocorrência extremamente provável em Cantinho. A manutenção dos reservatórios é de responsabilidade da Prefeitura Municipal, que não garante um estado de conservação adequado às SAC da comunidade, como pode ser visto na Figura 11. A realização de manutenções são esporádicas e ocorrem apenas para manutenção de bombas quando solicitado população.

A propósito, as falhas no sistema elétrico ou nas bombas dos chafarizes obtiveram FRPN de 848,63, também classificadas com alto risco, devido ao grau de detectabilidade moderado, já que inspeções podem não identificar o problema de maneira imediata e efetiva.

Raid *et al.* (2022) apontaram que o modelo de gestão de serviços mais adequado em soluções coletivas de abastecimento de água com captação subterrânea foi a gestão municipal, em virtude de, entre outras coisas, possuir relação mais próxima com o usuário. Entretanto, o diagnóstico realizado na comunidade Cantinho indicou que, quando ocorrem os problemas de falha no sistema elétrico ou na bomba, há dificuldade de comunicação com a Prefeitura Municipal, gerando longo tempo de espera para manutenção e, devido a paralização do sistema, necessidade de busca de outras fontes de abastecimento (PSA/UFCG, 2023b).

Assim como no SAA Lagoas dos Encantos, os especialistas demandaram atenção para a utilização de agrotóxicos e fertilizantes em torno do poço de captação, classificado com risco muito alto (873,49), devido a cultura de utilização destes sem controle e fiscalização nos cultivos da comunidade Cantinho. Salienta-se que foram detectados níveis elevados de nitrato na água dos chafarizes, quando da realização de análises na elaboração do PSA da comunidade, que podem indicar contaminação da água pelo uso de agrotóxicos nitrogenados.

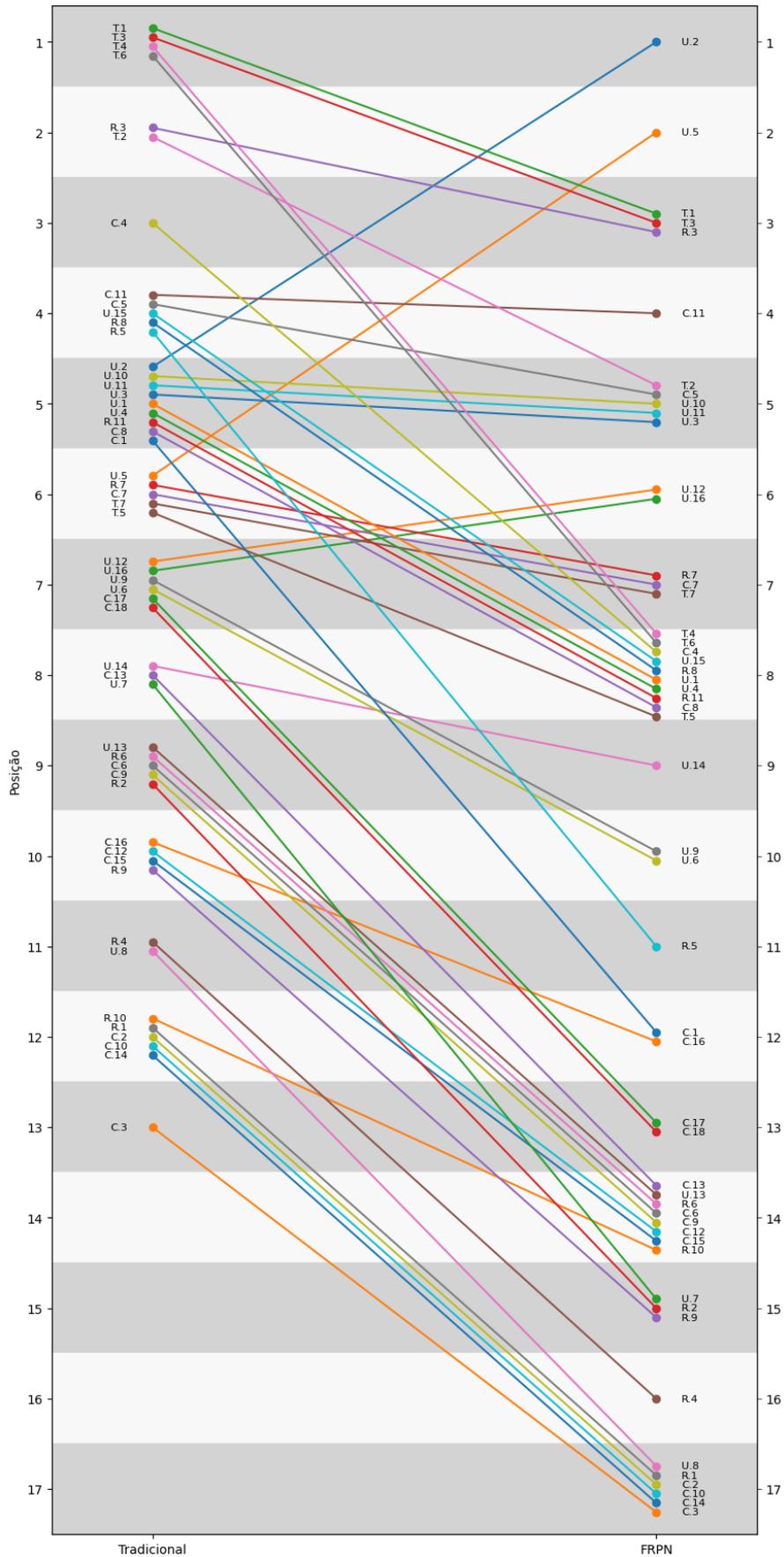
Ao serem utilizados na agricultura, estes se decompõem e liberam nitratos que podem ser transportados por água da chuva ou de irrigação os reservatórios subterrâneos, infiltrando-se no solo e percolando pelas camadas do solo. A ingestão de água contaminada por agrotóxicos pode causar uma série de problemas de saúde, desde doenças crônicas à deficiência de hemoglobina no sangue de crianças, indicando a necessidade de ações imediatas para mitigação desse risco (Brasil, 2014).

Medidas preventivas como o estabelecimento de zonas de proteção em torno da fonte de captação, sensibilização para uso consciente de agrotóxicos e adoção de práticas que minimizem a necessidade de agrotóxico nas produções locais, podem auxiliar na contenção de impactos deste evento perigoso na saúde da população (Correa; Ventura, 2021).

Ao se analisar o conjunto de eventos perigosos na Figura 20, nota-se que a metodologia FRPN aumentou quatro posições no *ranking* de priorização dos eventos perigosos, no caso de SAC, o que acarretou, de modo análogo ao SAA Lagoa dos Encantos, a redução na quantidade de empates. Entretanto, a oitava posição concentrou dez eventos perigosos, já a décima quarta concentrou oito, isso pode ocorrer devido à falta de granularidade nas escalas de avaliação, uma vez que os valores de entrada para cada termo linguístico no SIF foram fixados no Quadro 3 (Ribas *et al.*, 2021).

Uma maneira de solucionar este problema seria estabelecendo um intervalo de valores para cada termo linguístico (por exemplo, pouco severo podendo variar entre 1 e 2, medianamente severo entre 3 e 4 e assim por diante), solicitando que os especialistas não mais avaliassem os eventos perigosos pelos termos linguísticos, mas sim atribuindo valores da escala a cada um deles. Com isso, haveria uma redução ainda maior de situações de empates, pois escalas mais detalhadas ajudam na diferenciação de eventos que podem parecer semelhantes, mas que possuem nuances que os tornam mais ou menos críticos (Ivancan; Lisjak, 2021).

Figura 20 – *Slope chart* comparativo entre a metodologia tradicional e a FRPN – Cantinho



Fonte: Autoria própria (2024).

Outrossim, percebe-se que a metodologia sugerida deu maior relevância aos eventos perigosos associados ao manejo de água pelos usuários, como é o caso de U.2, U.5, U.11, U.3, U.12 e U.16. Isso ocorre devido ao baixo grau de detecção dos problemas, quando estes são de responsabilidade dos usuários.

As práticas de manejo de água variam significativamente entre diferentes usuários, aumentando a dificuldade de classificar estes eventos nas variáveis de entrada do modelo tradicional. Esses eventos perigosos representam um risco significativo que pode ser subestimado se não for dada a devida importância na avaliação de risco do PSA. Assim, ao se adicionar a detecção na avaliação, estes eventos ganham importância devido a imprevisibilidade de ações dos usuários, tornando difícil para as autoridades a inspeção e detectabilidade de práticas inadequadas (Subriadi; Najwa, 2020; Wu; Liu; Nie, 2021).

Ao se observar a Tabela 5, percebe-se que os eventos perigosos U.5, R.7, C.7, T.7 e T.5, empatados em sexto lugar na ordem de priorização da metodologia tradicional, obtiveram avaliação semelhante pelos especialistas nas escalas de severidade e ocorrência, extremamente severo e pouco provável, o que implicou na classificação destes como médios riscos na escala da Tabela 2. Entretanto, estes eventos podem apresentar diferentes complexidades tanto nas ações mitigadoras, quanto nas possibilidades de detecção, mascarados pelas limitações da metodologia sugerida pela OMS.

Tabela 5 – Comparação dos eventos perigosos U.5, R.7, C.7, T.7 e T.5

Evento	SV	OC	DT	TRAD	FRPN
U.5	ES	PP	SD	10	998,87
R.7	ES	PP	M	10	795,70
C.7	ES	PP	M	10	795,70
T.7	ES	PP	M	10	795,70
T.5	ES	PP	A	10	786,85

Fonte: Autoria própria (2024).

Quando se incorporou a detecção, os eventos passaram a ser classificados na escala de risco (Tabela 1) como alto ou muito alto, indicando a melhoria apresentada pela incorporação do Fuzzy e FMEA para avaliações de risco em soluções alternativas de abastecimento de água em comunidades rurais.

Ao se comparar os resultados obtidos para as SAC Cantinho e o SAA Lagoa dos Encantos, nota-se que a principal diferença se trata da ênfase proporcionada pela metodologia sugerida aos eventos perigosos relacionados ao manuseio da água pelos usuários. Os níveis

mais elevados de risco nessa situação indicam que a ausência de tratamento e rede de distribuição nas SAC transferem a responsabilidade do manejo de água, definida pela Lei Federal 11.445/2007 como serviço público, do gestor do sistema para o usuário.

Levando em consideração as diferentes fontes de água utilizadas para o abastecimento das comunidades, a avaliação do SAA Lagoa dos Encantos apresentou maior grau de risco para os eventos perigosos identificados na captação de água bruta, uma vez que a captação é realizada no Canal do Trabalhador. Isso se dá devido a maior exposição de corpos superficiais a fontes de contaminação externas e ações antrópicas, bem como a maior suscetibilidade condições ambientais que possam gerar alterações na qualidade da água captada.

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista que os planos de segurança da água visam garantir o acesso a água segura para população, este trabalho possibilitou o desenvolvimento de um modelo de avaliação de risco, utilizado no desenvolvimento de PSA, capaz de aprimorar a priorização de perigos e eventos perigosos para sistemas e soluções alternativas de abastecimento de água em comunidades rurais.

O diagnóstico realizado no SAA Lagoa dos Encantos e nas SAC de Cantinho possibilitou a elaboração de diagrama de fluxo e identificação dos eventos perigosos em todas as etapas do abastecimento de água. Estes eventos perigosos foram decorrentes de falta de infraestrutura adequada, falhas na operação e gestão, atividades humanas inadequadas e condições ambientais adversas, podendo incluir fatores químicos, microbiológicos, físicos e quantitativos.

No processo de elaboração do modelo, foi possível propor descrições dos termos linguísticos das escalas de probabilidade de ocorrência, severidade das consequências e probabilidade de detecção dos eventos perigosos adequadas à realidade do abastecimento de água rural, de modo a contribuir na escolha mais fiel dos termos linguísticos ao se avaliar os eventos perigosos.

A pesquisa revelou que a utilização de funções de pertinência triangulares e trapezoidais para as variáveis de ocorrência, severidade e detecção proporcionou uma representação clara e intuitiva dos riscos, facilitando a interpretação e a aplicação prática do modelo. Além disso, oferecem uma abordagem robusta para lidar com as incertezas e imprecisões associadas às avaliações de risco, minimizando discrepâncias entre as avaliações dos especialistas e aprimorando a precisão dos modelos.

Os gráficos de superfície gerados indicam uma resposta contínua e proporcional às mudanças nas variáveis de entrada, com um comportamento gradual e suave do risco. Este comportamento confirma a eficácia do modelo em capturar a complexidade e a sensibilidade destas, com destaque para a maior influência da severidade no nível de risco, mesmo quando a probabilidade de ocorrência é baixa.

Na realidade do SAA Lagoa dos Encantos, os eventos perigosos classificados com risco muito alto estão associados às etapas de distribuição e tratamento, que interferem na qualidade

da água distribuída. Alguns eventos perigosos da captação foram classificados com alto risco, devido a suscetibilidade à contaminação da água em corpos superficiais. Já para as SAC de Cantinho, os problemas com risco elevado estão principalmente associados ao manejo de água pelos usuários, já que as inspeções nas SAC não podem identificar se o manejo após a coleta nos chafarizes é realizado de acordo com as recomendações.

A aplicação do modelo nos sistemas e soluções de abastecimento de água analisados mostrou que a abordagem Fuzzy-FMEA permite uma avaliação mais detalhada e ajustada à realidade local, se comparada a metodologia tradicional, subsidiando a tomada de decisões de maneira mais efetiva quanto às medidas de controle necessárias para mitigar os riscos associados aos eventos perigosos. Os resultados práticos obtidos para eventos perigosos demonstram que o modelo foi capaz de gerar avaliações de risco mais granulares, solucionando algumas situações de empate devido à incorporação da detecção e aos pesos diferentes das variáveis de entradas quando submetidas à base de regras do SIF.

Recomenda-se que este modelo seja aplicado a realidades rurais distintas, para averiguação da capacidade de adaptação a diferentes tipos de infraestrutura do abastecimento de água e a contextos geográficos e econômicos. Além disso, na implementação do Fuzzy-FMEA, avaliar a sensibilidade do modelo à variação da quantidade de termos linguísticos em cada variável e suas escalas. Por fim, sugere-se o desenvolvimento de ferramentas computacionais que possam auxiliar gestores e operadores na implementação prática da metodologia, como um banco de dados para o abastecimento rural, oferecendo interfaces intuitivas e suporte para a análise de risco e a tomada de decisões rápidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12213 – Projeto de Captação de água de superfície para abastecimento público.** 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17080 - Plano de segurança da água: Princípios e diretrizes para elaboração e implementação.** 2023.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5626 – Sistemas Prediais Água Fria e Água Quente.** 2020.

AGNOLIN, G. F.; SOUZA, A. R.; BRITO, M. R.; SILVA, S. L. O. **Análise da qualidade da água para consumo humano de soluções alternativas coletivas e a ocorrência de doenças de veiculação hídrica no estado de Tocantins.** Revista de Engenharia e Tecnologia. V. 14, n. 4, p. 128-140, 2022. Disponível em: <<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20678>> Acesso em: 12 out. 2023.

AGUIAR, J. K. R.; PAES, D. F. F.; SILVA, L. O. **Avaliação do conhecimento de Produtores rurais do município de Cambuci-RJ sobre os riscos de utilização de agrotóxicos e descartes de embalagens.** Revista Científica Interdisciplinar, nº 1, v. 6, p. 1-22, 2021. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.51721/2526-4036/v6n1a1>> Acesso em: 10 jun. 2024.

AIAG – Automotive Industry Action Group. **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) - Reference Manual**, Fourth Edition. 2008. Disponível em: <https://www.lehigh.edu/~intribos/Resources/SAE_FMEA.pdf> Acesso em: 07 jul. 2023.

ALMEIDA, C. J.; ROMANO, U. A.; DAMIÃO, F. A.; MELO, K. C. **Controle do biofilme em reservatórios e tubulações de água potável.** Atas de Saúde Ambiental (São Paulo, online), vol. 7, p. 1-15, 2019. Disponível em: <<https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/ASA/article/view/1754>> Acesso em: 05 jun. 2024.

ALMEIDA, C. L.; SOBRINHO, J. F. **Convivência com o semiárido a partir do uso de cisternas de placas no município de Frecheirinhas, estado do Ceará, Brasil.** Agua y Territorio, n. 15, p. 89-102, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.17561/at.15.4613>> Acesso em: 23 mai. 2024.

ALVES, F. G. C.; ARAÚJO, F. T. V. **Sistemas de abastecimento em comunidades rurais do semiárido: a implantação do SISAR em Cristais, Cascavel, CE.** Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 37, n. 1, p. 78-86, 2016. Disponível em: <<https://ojs.unifor.br/tec/article/download/5695/4635>> Acesso em: 29 ago. 2023.

ANA – Agência Nacional de Água e Saneamento. **Relatório ODS 6 no Brasil.** Segunda edição. Brasília – DF, 2022. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c93c5670-f4a7-4de6-85cf-c295c3a15204/attachments/ODS6_Brasil_ANA_2ed_digital_simples.pdf> Acesso em: 13 jul. 2023.

ANDRADE, J. A.; NUNES, M. A. **Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região.** Revista espinhaço, v. n.2, p. 28-39, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.fjp.mg.gov.br/items/69f6da7d-3a70-408a-828c-97dcd4226f73>> Acesso em: 10 mai. 2024.

ARACATI. Plano Municipal de Saneamento Básico. **Produto P7 – Consolidação do PMSB e Proposta de Legislação.** Aracati: PROYFe/CONEN, 2021.

ARAÚJO JR, J. J.; BONI, S. S. N. **Acesso, qualidade e manutenção dos reservatórios de água de uma comunidade carente de São Luís.** Revista Interfaces, v. 11, n. 3, p. 2853-2864, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.16891/2317-434X.v11.e3.a2023.pp2853-2863>> Acesso em: 23 mai. 2024.

ARAÚJO, L. F.; CAMARGO, F. P.; NETTO, A. T.; VERNIN, N. S.; ANDRADE, R. C. **Análise da cobertura de abastecimento e da qualidade da água distribuída em diferentes regiões do Brasil no ano de 2019.** Ciência & Saúde Coletiva, v. 27(7), p. 2935-2947, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1413-8123202277.16472021>> Acesso em: 12 ago. 2022.

BALARAJU, J.; RAJ, M. G.; MURTHY, C. S. **Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine– A case study.** Journal of Sustainable Mining, v. 18, p. 257-268, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.08.002>> Acesso em: 28. mai. 2024.

BARROS, H. J. L.; CAMPOS, A. C. V.; OLIVEIRA, W. Z.; SANTOS, T. L.; SANTOS, S. C. **Avaliação Microbiológica da água de soluções alternativas coletiva do município de Marabá-PA.** Revista Saúde e Meio Ambiente, v. 12, n. 1, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufms.br/index.php/sameamb/article/view/10919>> Acesso em: 05 out. 2022.

BÁRTA, R. L.; SILVA, J. A. G.; DARONCO, C. R.; PRETTO, C.; STUMM, E. M. F.; COLET, C. F. **Qualidade da água para consumo humano no Brasil: revisão integrativa da literatura.** Vigilância Sanitária em Debate, V. 9, n. 4, p. 74-85, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.22239/2317-269X.01822>> Acesso em: 14 set. 2022.

BASSO, C.; SIQUEIRA, A. C. F.; RICHARDS, N. S. P. S. **Impactos na saúde humana e no meio ambiente relacionados ao uso de agrotóxicos: Uma revisão integrativa.** Research, Society and Development, v. 10, n. 8, p. 1-14, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17529>> Acesso em: 12 set. 2022.

BATISTA, G. S. **Modelagem do decaimento de cloro residual livre em redes de distribuição de água de comunidades rurais por meio de redes neurais artificiais / 124 f.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2024. Disponível em: <<https://www.ppgeca.ufcg.edu.br/dissertacoes-menu/dissertacoes-2024/send/190-dissertacoes-2024/806-modelagem-do-decaimento-de-cloro-residual-livre-em-redes-de-distribuicao-de-agua-de-comunidades-rurais-por-meio-de-redes-neurais-artificiais>> Acesso em: 25 jun. 2024.

BEDE, B. **Fuzzy Analysis**. In: Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol 295. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35221-8_8> Acesso em: 16 jul. 2023.

BEZERRA, A. D. A.; NOGUEIRA, E. R.; NOGUEIRA, E. R.; ARAÚJO, F. G. D. M.; BRANDÃO, M. G. A.; CHAVES, B. E.; PANTOJA, L. D. M. **Análise da potabilidade de água de chafarizes de dois bairros do município de Fortaleza, Ceará**. Acta Biomedica Brasiliensia, v. 8, n. 1, p. 24-34, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18571/acbm.119>> Acesso em: 05 jun. 2024.

BOSE, M.; MALI, K. **Designing fuzzy time series forecasting models: A survey**. International Journal of Approximate Reasoning, v. 111, p. 78–99, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.05.002>> Acesso em: 21 out. 2022.

BOWLES, J. B.; PELÁEZ, C. E. **Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis**. Reliability Engineering and System Safety, v. 50, p. 203-213, 1995. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095183209500068D>> Acesso em: 10 out. 2023.

BOZIKI, D.; BEROLDT, L.; PRINTES, R. C. **Situação atual da utilização de agrotóxicos e destinação de embalagens na área de proteção ambiental estadual rota sol, Rio Grande do Sul, Brasil**. Revista VITAS – Visões Transdisciplinares sobre Ambiente e Sociedade, n. 1, 2011. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/280601215>> Acesso em: 15 jul. 2024.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 2016. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm> Acesso em: 16 out. 2022.

BRASIL. Decreto nº 11.599, de 12 de julho de 2023. **Dispõe sobre a prestação regionalizada dos serviços públicos de saneamento básico, o apoio técnico e financeiro de que trata o art. 13 da Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, a alocação de recursos públicos federais e os financiamentos com recursos da União ou geridos ou operados por órgãos ou entidades da União de que trata o art. 50 da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Diário Oficial da União. Brasília – DF. 2023. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/D11599.htm> Acesso em: 01 ago. 2023.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978**. Diário Oficial da União. Brasília – DF. 2007. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm> Acesso em: 01 ago. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial da União. Brasília – DF. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm> Acesso em: 01 mai. 2024.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.** Diário Oficial da União. Brasília – DF. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm> Acesso em: 01 mai. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017.** Diário Oficial da União. Brasília – DF. 2020a. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art6> Acesso em: 01 ago. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Caderno Didático/Técnico para Curso de Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água em áreas rurais do Brasil.** Brasília – DF. 2020b. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/499/CADERNO_SUSTENTAR_Gestao_de_Sistemas_Abastecimento_de_agua_em_areas_rurais.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 05 nov. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual da solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano em pequenas comunidades utilizando filtro e dosador desenvolvidos pela Funasa/Superintendência Estadual do Pará.** Brasília – DF. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/476/Manual%20da%20SALTA-z%20WEB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 27 set. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS.** Brasília – DF. 2014. Disponível em: <https://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/saude-ambiental/-/asset_publisher/G0cYh3ZvWCm9/content/manual-de-controle-da-qualidade-da-agua-para-tecnicos-que-trabalham-em-etas?inheritRedirect=false> Acesso em: 01 jul. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Básico Rural – PNSR.** Brasília – DF. 2019. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/engenharia-de-saude-publica/>>

/asset_publisher/ZM23z1KP6s6q/content/programa-nacional-de-saneamento-rural-pnsr-?inheritRedirect=false> Acesso em: 04 set. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde.** Diário Oficial da União, Brasília – DF. Disponível em: <http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf> Acesso: 12 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021. **Dispõe sobre procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Diário Oficial da União. Brasília – DF. 2021. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html> Acesso em: 12 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Boletim epidemiológico: Monitoramento dos casos de arboviroses urbanas transmitidas pelo Aedes Aegypti (dengue, chikungunya e zika), v. 51, 2020a.** Disponível em: <<http://plataforma.saude.gov.br/anomalias-congenitas/boletim-epidemiologico-SVS-13-2020.pdf>> Acesso em: 05 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano [recurso eletrônico]** Brasília – DF, 2016. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretriz_nacional_plano_amostragem_agua.pdf> Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Plano de segurança da água: garantindo a qualidade e promovendo a saúde –um olhar do SUS.** Brasília. 2012. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/plano_seguranca_agua_qualidad>
BRASIL. Ministério da Saúde. **Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano – SISAGUA.** Brasília – DF. 2023. Disponível em: <<http://sisagua.saude.gov.br/sisagua/paginaExterna.jsf>> Acesso em: 13 out. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005 – Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.** Brasília – DF. 2005. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747#:~:text=Resolu%C3%A7%C3%A3o%20CONAMA%20n%C2%BA%20357%2C%20de,efluentes%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A4ncias.>>> Acesso em: 27 set. 2023.

BRITO, L. T. L.; SILVA, A. S.; PORTO, E. R. **Disponibilidade de água e gestão de recursos hídricos.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Brasília – DF. 2017. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/159648/1/OPB1514.pdf>> Acesso em: 14 nov. 2022.

CADORE, J. S.; TOCHETTO, M. **Recursos Hídricos: panorama geral do setor e perspectivas ao atendimento da Agenda 2030**. Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 9, n. 3, p. 122-136, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.5703347>> Acesso em: 10 nov. 2022.

CAMARGO, J. C. S. **O Sistema Integrado de Saneamento Rural - SISAR: uma política pública de inovação técnico-social para o acesso à água a comunidades rurais no Brasil**. Revista Política e Planejamento Regional, v. 9, n. 2, p. 314-334, 2022. Disponível em: <<https://www.revistappr.com.br/artigos/publicados/artigo-o-sistema-integrado-de-saneamento-rural---sisar-uma-politica-publica-de-inovacao-tecnico-social-para-o-acesso-a-agua-a-comunidades-rurais-no-brasil.pdf>> Acesso em: 30 ago. 2023.

CAPANEMA, L. X. L. **Implementação Do Novo Marco Legal Do Saneamento – A Importância Da Regulação Por Contrato Em Um Cenário Atual De Transição Regulatória**. BNDES Set., Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 5-40, 2022.

CARDOSO, G. C. C.; CRUZ, D. M.; BEZERRA, G. M. L. **Fortalecendo laços institucionais para a promoção da avaliação das políticas públicas no estado do Ceará**. I jornada cearense de pós-graduação e pesquisa em avaliação de políticas públicas, v. 1, p. 10-15, 2020. ISBN: 978-65-88492-29-1

Castro Neto, F. A. **Análise dos entraves nos investimentos em abastecimento de água potável no Estado do Ceará, de 2007 a 2016**. Dissertação (Mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Brasília-DF, 2020. Disponível em: <<https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/48760>> Acesso em: 25 jun. 2024.

CASTRO, C. N.; CEREZINI, M. T. **Saneamento rural no Brasil: a universalização é possível?**. Textos para discussão – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro – RJ, 2023. Disponível em: <dx.doi.org/10.38116/td2875-port> Acesso em: 27 ago. 2023.

CASTRO, C. N.; CEREZINI, M. T. **Saneamento rural no Brasil: desafios para a ampliação do acesso**. Boletim regional, urbano e ambiental – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. v. 28, p. 31-43, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11879/2/BRUA_28_Artigo_3_saneamento_rural_no_brasil.pdf> Acesso em: 15 ago. 2023.

CAVAIGNAC, A. L. O.; FORTE, L. L. N. **Utilização do FMEA para priorização de risco ocupacional: uma nova abordagem direcionada a construção civil**. Brazilian Journal of Production Engineering, v. 4(3), p. 132-149, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/v4n3_8> Acesso em: 13 set. 2023.

CORRÊA, R. F. M. **Elaboração de modelo conceitual para monitoramento de riscos à contaminação da água em comunidades rurais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP. 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12418?show=full>> Acesso em: 25 jun. 2024.

CORREA; R. F. M.; VENTURA, K. S. **Plano de Segurança da Água: elaboração de instrumento para análise de risco na captação de água em comunidades rurais**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v. 08, n. 57, p. 79-97, 2020. Disponível em: <doi.org/10.17271/2318847285720202087> Acesso em: 20 jul. 2023.

CORREA; R. F. M.; VENTURA, K. S. **Plano de Segurança da Água: Modelo conceitual para monitoramento de riscos à contaminação de água em comunidades rurais**. Eng. Sanit. Amb., v. 26, p. 369-379, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220190394>> Acesso em: 10 ago. 2022.

COSTA, V. V. F. V.; LACERDA JÚNIOR, O. S. **Análise físico-química e microbiológica de água de poço para consumo humano da comunidade do Camurupim localizado no município de Aracati-Ceará**. Revista OWL, v.1, n. 3, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.10253371>> Acesso em: 14 ago. 2024.

COUTINHO, R. P. A. **Trajetória político-institucional do saneamento básico no Brasil: do Planasa à Lei 14.026/2020**. Revista de Direito da Administração Pública. V. 1, n. 3, p. 100-129, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.47096/redap.v1i3.225>> Acesso em: 14 jul. 2022.

CRUZ-RIVERO, L.; MÉNDEZ-HERNÁNDEZ, M. L.; MAR-OROZCO, C. E.; AGUILAR-LASSERRE, A. A.; BARBOSA-MORENO, A.; SÁNCHEZ-ESCOBAR, J. **Functional Evaluation Using Fuzzy FMEA for a Non-Invasive Measurer for Methane and Carbon Dioxide**. Journal Symmetry, v. 14, n. 412, p. 1-17, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/sym14020421>> Acesso em: 07 out. 2023.

CUNHA, L. H. **Desigualdades nos padrões de acesso à água e limites da cidadania hídrica em comunidades rurais do semiárido**. Desenvolv. Meio Ambiente, v. 55, Edição especial - Sociedade e ambiente no Semiárido: controvérsias e abordagens, p. 99-116, 2020. Disponível em: <doi.org/10.5380/dma.v55i0.73371> Acesso em: 03 ago. 2023.

DALOSTO, D. N. **Análise da consistência do FMEA: uma abordagem quantitativa à uma ferramenta qualitativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/220>> Acesso em: 25 jul. 2023.

DANTAS, A. B.; BERNARDO, L. SANTOS, L. V. G.; MARQUE, M. B.; CONCEIÇÃO, N. R.; KILLER, N. A. **Identificação de macro causas dos eventos perigosos para a proposição de medidas de controle nos planos de segurança da água (PSAS)**. International Workshop For Innovation is Safe Drinking Water, I4SDWI, 2022. Disponível em: <[doi:10.20396/iwisdw.n1.2022.4794](https://doi.org/10.20396/iwisdw.n1.2022.4794)> Acesso em: 10 jun. 2024.

e_sus.pdf> Acesso em: 05 dez. 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 / 140 f.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental,

Porto Alegre-RS. 2022. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/249097>> Acesso em: 23 nov. 2022.

FENDRICH, B. W.; SOUSA, S. M. A. G. U.; SOUZA, A. A. U.; AGUIAR, C. R. L. **Lodo proveniente de ETA desidratado com emprego de manta geotêxtil: revisão bibliográfica.** Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 7, n. 2, p. 1-18, 2024. Disponível em: <<http://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-110>> Acesso em: 25 jun. 2024.

FERREIRA, J. A. C. **Modelo multicritério de avaliação de risco de segurança de barragens baseado em lógica fuzzy.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal-RN, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/58184>> Acesso em: 25 jun. 2024.

FERREIRA, J. G.; GOMES, M. F. B.; DANTAS, M. W. A. **Desafios e controvérsias do novo marco legal do saneamento básico no Brasil.** Brazilian Journal of Development. V. 7, n. 7, p. 65449-65468, 2021. Disponível em: <doi.org/10.34117/bjdv7n7-019> Acesso em: 05 ago. 23.

FERREIRA, L. A. F.; RIBEIRO, P. S. C.; ANDRADE, I. C. M.; GUIDES, R. M.; SANTOS, L. O. L.; CRUZ, L. M. O.; SANTOS, M. R. R.; REZENDE, S. **Saneamento rural no planejamento municipal: lições a partir do Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR).** Revista DAE, v. 67, n. 220, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.4322/dae.2019.054>> Acesso em: 30 ago. 2023.

FORTES, A. C. C.; BARROCAS, P. R. G.; KLIGERMAN, D. C. **A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso.** Saúde Debate, v. 43, n. Especial 3, p. 20-34, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0103-11042019S302>> Acesso em: 30 out. 2022.

FRANÇA, L. R. C.; SOUSA, A. F. N.; BATISTA, G. S.; CUNHA, P. H.; CARNEIRO, D. Q. **Vigilância da qualidade da água para consumo humano nos sistemas de abastecimento de água e soluções coletivas em comunidades rurais do estado do Ceará.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32., 2023, Belo Horizonte. Anais eletrônicos [...] Belo Horizonte: ABES, 2023a. p. 1-13. Disponível . Acesso em: 10 jun. 2024.

FRANÇA, L. R. C.; SOUSA, A. F. N.; CUNHA, P. H.; ARAÚJO, M. M. C.; GRADVOL, S. T. S. **Planos de Segurança da Água em comunidades rurais: análise de metodologias de implementação no Brasil e no mundo.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32., 2023, Belo Horizonte. Anais eletrônicos [...] Belo Horizonte: ABES, 2023b. p. 1-8. Disponível em: <https://cbesa.sigotech.online/storage/trabalhos/arquivos/completo/714_tema_xii.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2024.

FREITAS, E; CASTRO, S. V.; PENA, J.L.; REZENDE, S.; HELLER, L. Avaliação Político-Institucional do Modelo SISAR no Nordeste do Brasil. In: CASTRO, J.E. (ed). **Democratisation of water and sanitation governance by means of socio-technical**

innovation. Newcastle University, 2015. Disponível em: <https://eprints.ncl.ac.uk/file_store/production/216930/9E05CA65-6622-4E3C-B4D6-B75CD885EAC9.pdf> Acesso em: 03 out. 2022.

GARCIA, R. C. D. **Avaliação da substituição do cloro gás pela produção eletrolítica de hipoclorito de sódio in loco em estação de tratamento de água de grande porte.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental, Uberlândia-MG, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.727>> Acesso em: 12 jun. 2024.

GERAMIAN, A.; ABRAHAM, A. **Customer classification: A Mamdani fuzzy inference system standpoint for modifying the failure mode and effect analysis based three dimensional approach.** Expert Systems With Applications, v. 186, p. 1-11, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115753>> Acesso em: 10 out. 2023.

HAIDER, H.; ALKHOWAITER, M. H.; SHAFIQUZZAMAN, M. D.; ALSALEEM, M. A. S. S.; GHUMMAN, A. R. **Source to Tap Risk Assessment for Intermittent Water Supply Systems in Arid Regions: An Integrated FTA—Fuzzy FMEA Methodology.** Environmental Management, v. 67, p. 324–341, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00267-020-01400-7>> Acesso em: 12 jul. 2023.

HERSCHAN, J. *et al.* **Success factors for water safety plan implementation in small drinking water supplies in low- and middle-income countries.** Resources, 9(11), 126. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/resources9110126>> Acesso em: 10 out. 2023.

HOCHMAN, G. **A era do saneamento: as bases da política de Saúde Pública no Brasil.** Hucitec Editora – 3ª Edição. São Paulo – SP. 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 2022.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IEC – International Electrotechnical Commission. **Norma Internacional IEC 60812 - Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).** Edition 3.0, 2018. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60812%7Bed3.0%7Db.pdf> Acesso em 12 set. 2023.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Acesso à água nas regiões Norte e Nordeste do Brasil: desafios e perspectivas.** São Paulo – SP. 2018. Disponível em: <<https://sinapse.gife.org.br/download/acesso-a-agua-nas-regioes-norte-e-nordeste-do-brasil-desafios-e-perspectivas>> Acesso em: 03 jul. 2022.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégica Econômica do Ceará. **Pesquisa regional por amostra de domicílios do estado do Ceará (PRAD/CE).** 2021. Disponível em: <ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2021/01/PRAD_informe_N01_28_jan2021.pdf> Acesso em: 10 mai. 2024.

IVANCAN, J.; LISJAK, D. **New FMEA Risks Ranking Approach Utilizing Four Fuzzy Logic Systems**. *Machines* – MDPI, 9, 292, p. 1-22, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/machines9110292>> Acesso em: 09 mai. 2024.

JESUS, F. O.; BENTES, V. S.; SEGURA-MUNOZ, S. I.; MESCHEDE, M. S. C. **Eficácia das medidas domiciliares de desinfecção da água para consumo humano: enfoque para o contexto de Santarém, Pará, Brasil**. *Caderno de Saúde Pública*, 39(2), p. 1-14, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-311XPT205322>> Acesso em: 05 abr. 2024.

KELLY, E. R.; CRONK, R.; KUMPEL, E.; HOWARD, G.; BARTRAM, J. **How we assess water safety: A critical review of sanitary inspection and water quality analysis**. *Science of the Total Environment*, v. 718, p. 137-237, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137237>> Acesso em: 14 out. 2022.

KUMPEL, E.; DELAIRE, C.; PELETZ, R.; KISIANGANI, J.; RINEHOLD, A.; DE FRANCE, J.; SUTHERLAND, D.; KHUSH, R. **Measuring the Impacts of Water Safety Plans in the Asia-Pacific Region**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15(6), p. 12-23, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph15061223>> Acesso em: 05 set. 2023.

LACERDA M. C.; BATISTA, G. S.; SOUSA, A. F. N.; LACERDA, I. L. C.; ALMEIDA, M. N. V.; CUNHA, P. H.; ARAÚJO, M. M. C. RODRIGUES, A. C. L. **Correlação entre a ocorrência de doenças diarreicas agudas e os dados de vigilância da qualidade de água para consumo humano no Brasil**. *Revista Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 3, p. 1-27, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.54033/cadpedv21n3-214>> Acesso em: 18 jun. 2024.

ŁAPCZYŃSKA, D. **Fuzzy FMEA in Risk Assessment of Human-Factor in Production Process**. In: Burduk, A., Batako, A.D.L., Machado, J., Wyczółkowski, R., Dostatni, E., Rojek, I. (eds) *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance III*. ISPEM, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-44282-7_51> Acesso em: 05 set. 2023.

LAURENTI, R.; VILLARI, B. D.; ROZENFELD, H. **Problemas E Melhorias Do Método Fmea: Uma Revisão Sistemática a Literatura**. *Pesquisa & Desenvolvimento em Produção*, v. 10(1), p. 59-70, 2012. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20180421130937id_/http://www.revista-ped.unifei.edu.br/documentos/V10N01/06-1211-V10-N1-2012.pdf> Acesso em: 20 jun. 2023.

LEAL, D. U. **Desafios da promoção de saúde no meio rural brasileiro: uma revisão sistemática pelo método PRISMA (2017-2021)**. *Mulheres rurais e acesso às TIC [recurso eletrônico] : desigualdade no direito à comunicação e saúde / [organizadoras] : Ivonete da Silva Lopes, Jéssica Suzana Magalhães Cardoso, Daniela de Ulysséa Leal. – [recurso eletrônico]. – [Viçosa, MG : Ed. UFV, 2023] ISBN 978-85-60601-34-9*

LEITE, S. R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy**. *Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Computação Aplicada) – Universidade de Brasília,*

2019. Disponível em: <<http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/36965>> Acesso em: 10 jun. 2024.

LUCENA, D. V. **Avaliação da segurança da água de abastecimento por soluções alternativas na zona rural de Campina Grande-PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2568>> Acesso em: 15 ago. 2023.

Mamdani, E. H., & Assilian, S. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**. International Journal of Man-Machine Studies, v. 7(1), p. 1-13, 1975.

MAMDANI, E.; ASSILIAN, S. **An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller**. International Journal of Human-Computer Studies, v. 51, August 1999, p. 135-147. Disponível em: <<https://doi.org/10.1006/ijhc.1973.0303>> Acesso em: 05 mar. 2024.

MANCUSO, P. C. S.; SOUZA, R. M. G. L.; **Princípios e métodos utilizados em segurança da água para consumo humano**. Plano de segurança da água na visão de especialistas (livro eletrônico). Editora Setri. São Paulo – SP. 2015.

MARMO, C. R.; SILVA, W. T. L. **Saneamento básico rural: tecnologias e soluções**. Saúde e Ambiente para Populações do Campo, das Florestas e das Águas - EMBRAPA. p. 105-123. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/138662/1/cap-Marmo-e-Wilson.pdf>> Acesso em: 05 mai. 2024.

MARQUES, C. M. **Decision support neuro-fuzzy model based on customer in shopping center**. Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção, v. 10, n. 17, p. 78-96, 2022. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/relainep/article/view/83452>> Acesso em: 10 out. 2023.

MAYER, J. S. L. **Diagnóstico de soluções alternativas coletivas de abastecimento de água em comunidades rurais / M468d**. Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <<https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/2229/JulianadeSousaLimaMayer.pdf?sequence=3>> Acesso em: 22 jun. 2023.

MENDES, L. M. A.; SARMENTO, H. **Deteção de bactérias na água tratada e armazenada em reservatórios domésticos utilizando citometria de fluxo**. Recursos Hídricos, Associação portuguesa dos recursos hídricos, v. 43, n. 2, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.5894/rh43n2-cti4>> Acesso em: 03 jun. 2024.

MENEZES, C. A. G. **FMEA de processo na indústria automotiva: uma análise sobre a aplicação do Número de Prioridade de Risco (RPN)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/b7db41d2-4f43-4a12-aa7d-ff9aae3db40f/content>> Acesso em: 12 jun. 2024.

MIRANDA, C.; OLIVEIRA, R. M. **Utilização de agrotóxicos no assentamento três pontes, Município de Perolândia (GO): fatores de risco á saúde.** Revista Geográfica de América Central, n. 63, p. 368-385, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.15359/rgac.63-2.14>> Acesso em: 03 jun. 2024.

MITTAL, K.; JAIN, A.; VAISLA, K. S.; CASTILLO, O.; KACPRZYK, J. **A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 95, p. 1-12, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103916>> Acesso em: 17 out. 2023.

MOORTHI, P. V. P.; SINGH, A. P.; AGNIVESH, P. **Regulation of water resources systems using fuzzy logic: a case study of Amaravathi dam.** Applied Water Science 8:132, p. 1-11, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13201-018-0777-8>> Acesso em: 03 jun. 2024.

MORGAN, M. G.; HENRION, M. **Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis.** Cambridge University Press. 1992.

MUOIO, R.; CARETTI, C.; ROSSI, L. SANTIANNI, D.; LUBELLO, C. **Water safety plans and risk assessment: A novel procedure applied to treated water turbidity and gastrointestinal diseases.** International Journal of Hygiene and Environmental Health, v.223, p. 281-288, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.07.008>> Acesso em: 03 jun. 2024.

NASERI, I.; YENGEJEH, R. J.; VERIJKAZEMI, K.; CHERAGHI, M. **Study of Risks in Rural Water Supply Systems of Khorramshahr City, Iran, Based on Water Safety Plan.** Journal of Advances in Environmental Health Research, v. 10(1), p. 47-58, 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.32598/JAEHR.10.1.1236>> Acesso em: 17 set. 2023.

NASSAR, S. M. **Sistemas Especialistas Probabilísticos.** INE, Departamento de Informática e Estatística, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

OLIVEIRA JR., 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.** Epidemiol. Serv. Saúde, v. 8 (1), p. 1-13, 2019. Disponível em: <doi.org/10.5123/S1679-49742019000100024> Acesso em: 14 set. 2023.

OPAS – Organização Panamericana de Saúde. **Manual Simplificado para el Desarrollo de Planes de Seguridad del Agua (PSA) en Pequeñas Comunidades.** OMS, 2011. Disponível em:

<<https://aloas.org/institucional/Documents/Manual%20Simplificado%20PSA%20Sistemas%20RVL.pdf>> Acesso em: 02 ago. 2022.

PASTINA, E. C.; NOGUEIRA, J. R.; TERRA, P. K. S.; MIRANDA, R. B. G.; WINKEL, V. R. C. **Impressões sobre as principais alterações do marco legal de saneamento.** Caderno Jurídico Rio de Janeiro, v.2. n.3, p. 6-17, 2022. Disponível em: <

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22444/1/PRArt_Marco%20legal%20de%20saneamento_Cadernos%20Jur%C3%ADdicos_n2%2C%20v3.pdf> Acesso em: 11 out. 2023.

Pedrycz, W. and Gomide, F. **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. MIT Press, Cambridge, MA. 1998.

PENTEADO, T. B.; BRANCHI, B. A. **Água e Saneamento básico: Os direitos humanos para o desenvolvimento sustentável**. Interfaces Científicas: Humanas e Sociais. V. 10, n. 1, p. 414-427, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.17564/2316-3801.2023v10n1p414-427>> Acesso em: 14 set. 2023.

PEREIRA, J. R.; BARBOSA, J. R. A.; MEDEIROS, S. R. F. Q. **Projeto hídrico e transformações territoriais no Ceará – Brasil**. Revista GeoNordestes, Ano XXXIV, n.1, p. 55-71, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.33360/RGN.23182695.2023.il.p.55-71>> Acesso em: 03 jun. 2024

PESCKE, I. K.; PEREZ, K. J.; LARA, D. M. **Se não agora, quando? Água e Saneamento como ODS da Agenda 2030 e a realidade no Rio Grande do Sul (Brasil)**. Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 17, n. 2, p. 433-451, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.34024/revbea.2022.v17.13422>> Acesso em: 19 ago. 2022.

PSA/UFCG – Plano de segurança da água, Universidade Federal de Campina Grande. **Relatório de diagnóstico do SAA – Lagoa Nova, Lagoa da Cruz, Lagoa dos Porcos e Lagoa dos Ferreiras**. Fortaleza-CE, 2023a.

PSA/UFCG – Plano de segurança da água, Universidade Federal de Campina Grande. **Relatório de diagnóstico das SAC – Cantinho**. Fortaleza-CE, 2023b.

PUNDIR, S.; SINGH, R.; SINGH, P.; KANDARI, V. **Risk assessment and water safety planning for rural water supply in Uttarakhand, India**. Environ Monit Assess v. 193:795, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10661-021-09609-7>> Acesso em: 01 mai. 2024.

PUTRI, S. N. SAPUTRO, D. R. S. **Construction fuzzy logic with curve shoulder in inference system Mamdani**. Journal of Physics: Conference Series 1776 (2021) 012060. Disponível em: <[doi:10.1088/1742-6596/1776/1/012060](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1776/1/012060)> Acesso em: 05 de out. 2023.

RABELO, D. Q.; CAVALCANTE, J. M. F.; COSTA, D. R.; MATTOS, S. H. **Avaliação dos impactos ambientais no matadouro público municipal de Morada Nova-CE**. In: Anais eletrônicos. XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2018, Maceió-AL. Disponível em: <https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_266_528_35671.pdf> Acesso em: 10 jul. 2024.

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**. Eng Sanit Ambient, v.27, n.4, p. 795-

803, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220210160>> Acesso em: 30 ago. 2023.

RAZEE, M. J.; YOUSEFI, S.; ESHKEVARI, M.; VALIPOUR, M.; SBERI, M. **Risk analysis of health, safety and environment in chemical industry integrating linguistic FMEA, fuzzy inference system and fuzzy DEA**. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, v. 34, p. 201–218, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00477-019-01754-3>> Acesso em: 16 jul. 2023.

REAL-Water. **Synthesis of Water Safety Planning Efforts in Ghana**. United States Agency for International Development (USAID) Rural Evidence and Learning for Water Project. 2023. Disponível em: <<https://www.globalwaters.org/resources/assets/synthesis-water-safety-planning-efforts-ghana>> Acesso em: 22 jul. 2023.

RESSEL, L. B.; BECK, C. L. C.; GUALDA, D. M. R.; HOFFMANN, I. C.; SILVA, R. M.; SEHNEM, G. D. **O uso do grupo focal em pesquisa qualitativa**. Texto Contexto Enferm, v. 17(4), p. 779-86, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/tce/a/nzznnfzrCVv9FGXhwnGPQ7S/>> Acesso em: 15 out. 2023.

RIBAS, J. R.; ARCE, M. E.; SOHLER, F. A.; SUÁREZ-GARCÍA, A. **Multi-criteria risk assessment: Case study of a large hydroelectric Project**. Journal of Cleaner Production v. 227, p. 237-247, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.043>> Acesso em: 04 abr. 2024.

RIBAS, J. R.; SEVERO, J. C. R.; GUIMARÃES, L. F.; PERPETUO, K. P. C. **A fuzzy FMEA assessment of hydroelectric earth dam failure modes: A case study in Central Brazil**. Energy Reports, v. 7, p. 4412–4424, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.012>> Acesso em: 05 out. 2023.

RIBEIRO, P. G.; PEREIRA, I.; SANTOS, C. C. A.; FRANCO, C. S.; MARQUES, R. F. P. V. **Qualidade da água subterrânea e tratamento simplificado para abastecimento humano do Instituto Eterna Misericórdia de Lavras-MG**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 8, n. 3, p. 566-581, 2019. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6867> Acesso em: 20 set. 2023.

ROCHA, A. A. **Histórias do saneamento (Livro Eletrônico)**. Editora Edgar Blucher – 1ª Edição. São Paulo – SP. 2016.

ROEGER, A.; TAVARES, A. F. **Water safety plans by utilities: A review of research on implementation**, Utilities Policy, v. 53, p. 15-24, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jup.2018.06.001>> Acesso em: 01 out. 2022.

ROLAND, N.; TRIBST, C. C. L.; SENNA, D. A.; SANTOS, M. R. R.; REZENDE, S. **A ruralidade como condicionante da adoção de soluções de saneamento básico**. Revista DAE, v. 67, n. 20, p. 15-35, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.4322/dae.2019.053>> Acesso em: 20 ago. 2023

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. Second edition. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, England. 2010.

ROZA, M. X. T.; ARAÚJO, J. A. **Modelos associativistas de gestão de saneamento rural**. Revista de Economia Regional Urbana e do Trabalho, v. 9, n. 1, p. 125-149, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21680/2316-5235.2020v9n1ID21592>> Acesso em: 25 mai. 2024.

SANT'ANNA, A. P.; PINTO JR, R. P. S. **Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA**. Revista Eletrônica Sistemas & Gestão 5 (3), p. 79-191, 2010. Disponível em: <<https://revistasg.emnuvens.com.br/sg/article/download/V5N3A5/V5N3A5>> Acesso em: 25 mai. 2024.

SANTANA JR, F. G.; PEDREIRO, M. R. M. **Avaliação e dimensionamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água em zona rural**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 10, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.51891/rease.v9iro.12191>> Acesso em: 25 mai. 2024.

SANTOS, L. R.; NOGUEIRA, V. L.; OLIVEIRA, S. M. S. Serviços e departamentos autônomos na gestão do saneamento básico. In: PHILIPPI JR, A.; GALVÃO JR, A. C. **Gestão do Saneamento Básico: Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário**. Barueri – SP. 2012.

SENAPATI, T.; YAGER, R. R. **Fermatean fuzzy sets**. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, v. 11, p. 663–674, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12652-019-01377-0>> Acesso em: 10 out. 2023.

SETTY, K.; FERRERO, G. **Water Safety Plans**. Oxford Research Encyclopedia, p. 1-28, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190632366.013.338>> Acesso em: 05 mai. 2023.

SILVA, L. F.; ALVES, J. S. **Logística reversa das embalagens de agrotóxicos geradas em Niquelândia/GO**. Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 1, p. 139-156, 2024. Disponível em: <<https://www.revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/15383>> Acesso em: 10 jun. 2024.

SILVA, L. R.; ACHON, C. L.; ISAAC, R. L. **Análise crítica da gestão de lodo gerado em Estações de Tratamento de Água – Cenário brasileiro**. International Workshop For Innovation is Safe Drinking Water, I4SDWI, 2022. Disponível em: <[doi:10.20396/iwisdw.n1.2022.4800](https://doi.org/10.20396/iwisdw.n1.2022.4800)> Acesso em: 10 jun. 2024.

SILVA, T. C. S.; BOAS, J. Q. V. **A nova natureza jurídica da água e suas consequências em face da outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Revista eletrônica do curso de Direito – UFSM, v. 8, n.1, p. 141-158, 2013. Disponível em: <[doi:10.5902/198136948853](https://doi.org/10.5902/198136948853)> Acesso em: 07 de mai. 2024.

SILVEIRA, A. B. G. **Explorando o déficit em saneamento no Brasil: evidências da disparidade urbano-rural**. Paranoá: água e sociedade, Brasília, no 10, p. 37-48, 2013.

Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/download/10634/9360/19071> Acesso em: 17 ago. 2023.

SNIS – Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático – Visão Geral**. 2022. Disponível em: < https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos_snis> Acesso em: 09 ago. 2023.

SOFISTE, V. V.; DUARTE, J. C. **Reduzindo incertezas e imprecisões na análise lógica quantitativa de riscos de projetos utilizando lógica fuzzy**. Revista Brasileira de Computação Aplicada, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2022. Disponível em: <doi.org/10.5335/rbca.v14i1.13008> Acesso em: 10 jun. 2023.

SOUSA, D. G.; MARQUES, D. J. S.; SERRA, R. B. G. SOUSA, A. C. FIGUEIREDO, G. J. A. **Uma percepção ambiental de agricultores da comunidade Águas Turvas sobre o uso de agrotóxico na região da Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, João Pessoa-PB**. Revista brasileira de educação ambiental, v. 13, n. 2, p. 332-339, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/334175955_Uma_percepcao_ambiental_de_agricultores_da_comunidade_aguas_turvas_sobre_o_uso_de_agrotoxico_na_regiao_da_bacia_hidrografica_do_Rio_Gramame_Joao_Pessoa_PB> Acesso em: 10 jun. 2024.

SOUZA JR, E. G. **Agrotóxicos na Água Potável: Considerações sobre os Municípios da Bacia Hidrográfica do rio Itabapoana**. Boletim do Observatório Ambiental, 2021. Disponível em: < doi.org/10.19180/2177-4560.v15n12021p60-74> Acesso em: 12 set. 2023.

SOUZA, D. L. A. **Análise dos impactos ambientais relacionados às perdas de água em rede de distribuição: estudo de caso em Olinda/PE**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/18595>> Acesso em: 12 jun. 2024.

SOUZA, R. R.; SANTOS, M. M. C. **Caixa d'água limpa: uma alternativa para garantia de saúde pública**. Revista Saúde e Meio Ambiente – RESMA, Três Lagoas, v. 8, n.1, p. 96-113, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/sameamb/article/view/6295/pdf_78> Acesso em: 12 jun. 2024.

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 (2019). Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115288>> Acesso em: 10 mai. 2024.

STRING, G.; LANTAGNE, D. **A systematic review of outcomes and lessons learned from general, rural, and country-specific Water Safety Plan implementations**. Water Science & Technology: Water Supply, v. 16.6, p. 1580-1594, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/ws.2016.073>> Acesso em: 28 ago. 2023.

SUBRIADI, A. P.; NAJWA, N. F. **The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment.** Heliyon, v. 6, p. 1-12, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03161>> Acesso em: 10 set. 2023.

TEIXEIRA, L. M. **Análise qualitativa da água subterrânea utilizando sistema de inferência fuzzy.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/30020>> Acesso em: 30 mai. 2023.

TESTIK, O.M.; UNLU, E. T. **Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories.** Qual Reliab Eng Int., v. 39(2), p. 575-589, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/qre.3198>> Acesso em: 25 set. 2023.

UNICEF – United Nations International Children’s Emergency Fund. **The climate-changed child: A Children’s Climate Risk Index supplement.** UNICEF, 2023. Disponível em: <<https://www.unicef.org/reports/climate-changed-child#download-the-report>> Acesso em: 05 mar. 2023.

VAN DEN BERG, H. H. J. L.; FRIEDERICHS, L.; VERSTEEGH, J. F. M.; SMEETS, P. W. M. H.; RODA HUSMAN, A. M. **How current risk assessment and risk management methods for drinking water in The Netherlands cover the WHO water safety plan approach.** International Journal of Hygiene and Environmental Health, v. 222, p. 1030-1037, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.07.003>> Acesso em: 10 mai. 2024.

VENTURA, S. V.; FILHO, P. V.; NASCIMENTO, S. G. **PSA implementado na estação de tratamento de água de Guaraú, São Paulo.** Eng. Sanitária Ambiental, v. 26, p. 109-119, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522019169881>> Acesso em: 02 nov. 2023.

WHO – World Health Organization. **A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality.** Second Edition. Genebra, 2021. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241513760>> Acesso em: 14 set. 2022.

WHO – World Health Organization. **A guide to equitable water safety planning: ensuring no one is left behind.** Genebra, 2019. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241515313>> Acesso em: 22 set. 2023.

WHO – World Health Organization. **Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating The First Addendum.** Genebra, 2017. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>> Acesso em: 02 out. 2022.

WHO – World Health Organization. IWA - International Water Association. **Global status report on water safety plans: A review of proactive risk assessment and risk management practices to ensure the safety of drinking-water.** 2017. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-WSH-17.03>> Acesso em: 30 set. 2022.

WHO – World Health Organization. **Strengthening operations and maintenance through water safety planning: a collection of case studies.** Genebra, 2018. Disponível em:

<<https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-WSH-18.69>> Acesso em: 15 out. 2022.

WHO – World Health Organization. **Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers**. Second edition. 2023a. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789240067691>> Acesso em: 10 jun. 2022.

WHO – World Health Organization. **WHO global water, sanitation and hygiene: annual report 2022**. Genebra, 2023b. Disponível em: <<https://reliefweb.int/attachments/e1f2c7f4-91a7-45c6-9610-e00f1f264f04/9789240076297-eng.pdf>> Acesso em: 15 set. 2022.

WU, Z.; LIU, W.; NIE, W. **Literature review and prospect of the development and application of FMEA in manufacturing industry**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 112, p. 1409–1436, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06425-0>> Acesso em: 10 set. 2023.

ZADEH, L. A. **Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes**. IEEE Trans Syst Man Cybernet, v. 3, p. 28–44, 1973. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>> Acesso em: 22 set. 2023.

ZAHAN, I.; NASRIN, R. **An Introduction to Fuzzy Topological Spaces**. Advances in Pure Mathematics, v. 11, p. 483-501, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.4236/apm.2021.115034>> Acesso em: 10 nov. 2023.

ZIMMERMANN, H.J. **Fuzzy set theory**. Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat, v. 2, p. 317–332, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/wics.82>> Acesso em: 21 out. 2023.

ZINI, L. B. **Contribuições de avaliação de risco para a regulamentação na qualidade da água para consumo humano no Brasil**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2021. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/232740>> Acesso em: 14 jun. 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Consulta aos especialistas para construção dos conjuntos Fuzzy

Definição dos conjuntos Fuzzy para análise de risco na metodologia de Planos de Segurança da Água (PSA)

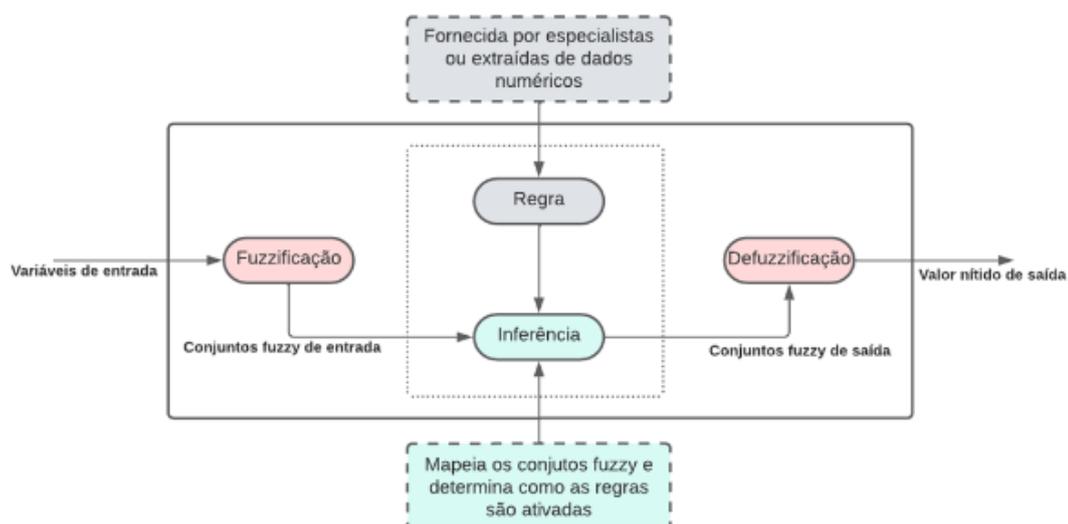
Faça login no Google para salvar o que você já preencheu. Saiba mais

Sistema de inferência Fuzzy

Um sistema de inferência *fuzzy* é utilizado para modelar o comportamento de sistemas complexos, reduzindo a incerteza, ambiguidade e subjetividade nas informações. O sistema opera considerando as regras e as entradas para determinar a saída *fuzzy*, que é posteriormente defuzzificada para obter um valor nítido que representa a ação a ser tomada, como apresentado na figura abaixo.

Os conjuntos *fuzzy* são uma ferramenta matemática para lidar com a incerteza e a imprecisão, permitindo a modelagem de situações do mundo real de uma maneira mais flexível e expressiva do que os conjuntos clássicos.

O objetivo deste questionário é definir os conjuntos fuzzy de entrada, a partir da associação dos termos linguísticos a uma escala predefinida.



APÊNDICE A – Consulta aos especialistas para construção dos conjuntos Fuzzy (continuação)

Exemplo

Para avaliar o nível de calor de uma cidade, foram estabelecidos cinco termos linguísticos (muito frio, frio, ameno, quente e muito quente) e uma escala de 1-10. O especialista definiu um valor da escala para cada um dos termos linguísticos, a partir das descrições destes (ex. Muito frio - temperatura abaixo de 0°C). Na Figura abaixo, o especialista definiu, a partir da sua percepção para a descrição realizada ao termo linguístico "muito frio", que este possui "peso 1", acreditando que este valor é o que melhor representa o termo linguístico.

Em contrapartida, o especialista acreditou que há uma diferença mais significativa entre os pesos dos termos "Ameno" e "muito quente", uma vez que para este nível de calor "ameno" está mais próximo das temperaturas mais frias.

Salienta-se que não é permitido valores repetidos entre os termos linguísticos e estes devem respeitar uma ordem crescente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Muito frio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Frio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ameno	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Quente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muito quente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

APÊNDICE B – Avaliação de risco para os eventos perigosos do SAA Lagoa dos Encantos

Etapa	Termo linguístico	SV	OC	DT	TRAD	FRPN
Distribuição	Falta de monitoramento de qualidade da água na distribuição	ES	MP	SD	20	1000
Tratamento	Interrupção do fornecimento de produtos químicos por parte do prestador	ES	PP	SD	10	998,87
Tratamento	Falta de controle na quantidade de produto químico e dosagem	ES	P	B	15	873,92
Distribuição	Contaminação da água por meio de canalização danificada; mistura de água de outras fontes	ES	MP	M	20	848,63
Captação	Chuvas intensas com elevação na turbidez da água	S	EP	M	15	848,63
Tratamento	Equipamento funcionando de forma irregular	ES	P	M	15	848,63
Captação	Utilização de agrotóxicos e fertilizantes em torno da fonte de água	MTS	P	B	12	848,63
Captação	Presença de fossa rudimentar a montante; contaminação fecal através de lixiviação de resíduos humanos ou de animais	S	MP	B	12	848,63
Distribuição	Presença de biofilme	MTS	P	B	12	848,63
Captação	Ocorrência de seca, inviabilizando a captação	ES	PP	B	10	848,63
Distribuição	Presença de tubulações de esgoto e de água muito próximas (contaminação cruzada)	ES	PP	B	10	848,63
Captação	Lançamento de efluentes (domésticos ou industriais) em torno da fonte	S	P	SD	9	839,68
Captação	Existência de outra fonte de poluição até 10 metros da fonte	S	P	SD	9	839,68
Captação	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	ES	PP	M	10	795,70
Captação	Contaminação da água provocada por acidentes e/ou incêndios	ES	PP	M	10	795,70
Tratamento	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	ES	PP	M	10	795,70
Reservação	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	ES	PP	M	10	795,70
Captação	Abate de animais em torno da fonte	S	PP	SD	6	786,86
Reservação	Estagnação da água devido ao baixo consumo, uso intermitente ou longos períodos sem uso	MTS	I	SD	4	786,86
Captação	Aquicultura (psicultura ou carcinicultura) no reservatório ou a montante	MTS	EP	A	20	786,85
Tratamento	Cloro residual livre insuficiente (baixa dosagem)	ES	MP	A	20	786,85
Distribuição	Contaminação da água por meio de canalização/rede exposta	ES	MP	A	20	786,85
Tratamento	Excesso de cloro residual livre (alta dosagem)	ES	P	A	15	786,85
Captação	Disposição de resíduos sólidos em torno da fonte e/ou recebe seus lixiviados	S	MP	A	12	786,85
Captação	Presença elevada de algas na área de captação	MTS	P	M	12	786,85
Reservação	Desprendimento de biofilme	MTS	PP	B	8	764,07
Reservação	Práticas inadequadas de higiene e/ou ausência de limpeza do reservatório	MTS	PP	B	8	764,07
Reservação	Acúmulo de biofilme	MTS	PP	B	8	764,07
Captação	Ocorrência de cheia ou inundação; inviabilização temporária na captação de água	S	P	B	9	700,50
Captação	Contaminação por água salina / água do mar	S	P	B	9	700,50

Distribuição	Presença de ar na tubulação/variação de pressão e intermitência na distribuição	S	P	B	9	700,50
Tratamento	Ausência de medidas de segurança no armazenamento de produtos químicos	MTS	PP	M	8	696,89
Tratamento	Baixa frequência de lavagem do filtro (mais de 48 horas entre as lavagens) ou lavagem de forma inadequada	MTS	PP	A	8	696,89
Reservação	Reservatório de armazenamento está rachado, com vazamentos ou infiltração	MTS	PP	M	8	696,89
Reservação	Corrosão de materiais de construção	MTS	PP	M	8	696,89
Distribuição	Práticas de higiene inadequadas durante reparo de tubulações	MTS	PP	A	8	696,89
Captação	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	S	PP	B	6	645,02
Captação	Presença de carcaças de animais ao redor da fonte	MS	P	B	6	645,02
Captação	Presença de necrochorume de cemitério em torno da fonte	S	PP	B	6	645,02
Distribuição	Contaminação da água por cimento proveniente de revestimentos ou durante novas instalações	S	I	B	3	645,02
Captação	Falha elétrica	S	P	M	9	637,73
Captação	Falha mecânica e estrutural no sistema de captação	S	P	A	9	637,73
Distribuição	Existência de ponto de furto de água	MS	MP	M	8	503,09
Captação	Entupimentos e/ou assoreamento na área de captação	S	PP	M	6	503,09
Reservação	Inundação da válvula por águas superficiais	S	PP	M	6	503,09
Distribuição	Existência de ponto de vazamento (perda de água)	MS	P	M	6	503,09
Distribuição	Contaminação da água por corrosão de tubos e válvulas de ferro	S	I	M	3	503,09
Tratamento	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	S	PP	MA	6	361,25
Reservação	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	S	PP	MA	6	361,25
Reservação	Área sem proteção ou danificada; acesso de animais e pessoas	S	PP	MA	6	361,25
Captação	Falta de proteção (cerca imprópria), permitindo acesso de animais e pessoas	PS	EP	MA	5	361,25
Captação	Contaminação residual da água provocada pelo tráfego (carros, barcos, área de estacionamento, etc.)	PS	P	B	3	361,25
Captação	Presença de pessoas com comportamento inadequado e falta de higiene em torno da fonte	PS	P	M	3	219,51
Captação	Lavagem de roupas e banho na área de captação	PS	P	A	3	219,51
Captação	Contaminação da água provocada por atividade recreativa ou atividades afins	PS	P	A	3	219,51
Captação	Falta de placa de aviso sobre captação	PS	MP	MA	4	152,53
Reservação	Acúmulo de fezes de animais na tampa do reservatório	PS	PP	MA	2	152,53
Reservação	Drenagem inadequada e acúmulo de água	PS	PP	MA	2	152,53

APÊNDICE C – Avaliação de risco para os eventos perigosos das SAC de Cantinho

Etapa	Termo linguístico	SV	OC	DT	TRAD	FRPN
Usuário	Contaminação da água durante manipulação da água, por falta de higiene humana e animal	MTS	P	SD	12	1000,00
Usuário	Utilização de recipientes oriundos de armazenamento de produtos químicos para armazenar ou beber a água	ES	PP	SD	10	998,87
Tratamento	Inexistência de equipamentos para tratamento	ES	EP	B	25	990,17
Tratamento	Falta de controle na quantidade de produto químico e dosagem	ES	EP	B	25	990,17
Reservação	Desprendimento de biofilme	MTS	EP	B	20	990,17
Captação	Utilização de agrotóxicos e fertilizantes em torno do poço	S	EP	B	15	873,49
Tratamento	Ausência de medidas de segurança no armazenamento de produtos químicos	MTS	EP	M	20	848,63
Captação	Falha no sistema elétrico ou na bomba	S	EP	M	15	848,63
Usuário	Utilização de recipientes sujos para armazenamento de água	MTS	P	B	12	848,63
Usuário	Manipulação da água sem higiene adequada	MTS	P	B	12	848,63
Usuário	Torneira ou acessórios inadequados ou contaminados	S	MP	B	12	848,63
Usuário	Armazenamento em recipiente sem tampa e/ou danificados	S	P	SD	9	839,68
Usuário	Utilização de copos ou recipientes sujos para consumir água	S	P	SD	9	839,68
Reservação	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	ES	PP	M	10	795,70
Captação	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	ES	PP	M	10	795,70
Tratamento	Vandalismo (adição de químicos ou outros produtos perigosos)	ES	PP	M	10	795,70
Tratamento	Cloro residual livre insuficiente (baixa dosagem)	ES	EP	A	25	786,85
Tratamento	Interrupção do fornecimento de produtos químicos por parte do prestador	ES	EP	A	25	786,85
Captação	Contaminação no equipamento de saída do poço	MTS	MP	A	16	786,85
Usuário	Filtração com panos ou equipamentos sujos	ES	P	A	15	786,85
Reservação	Infiltração/vazamento de água	S	EP	A	15	786,85
Usuário	Coleta com recipiente inadequado, danificado ou sujo	MTS	P	M	12	786,85
Usuário	Presença de fossa rudimentar ou local de defecação a menos de 30 metros	S	MP	A	12	786,85
Reservação	Presença de algas	MTS	P	A	12	786,85
Captação	Presença de fossa rudimentar ou local de defecação a menos de 10 metros do poço	S	MP	A	12	786,85
Tratamento	Excesso de cloro residual livre (alta dosagem)	ES	PP	A	10	786,85
Usuário	Estagnação da água devido ao baixo consumo, distribuição intermitente ou longos períodos sem uso	MTS	PP	B	8	764,07
Usuário	Acesso de animais domésticos ao local de armazenamento de água	S	P	B	9	700,50
Usuário	Uso de recipiente para coleta que água que também é utilizado para outros fins (materiais potencialmente poluidores)	S	P	B	9	700,50
Reservação	Conservação inadequada de reservatórios/reservatórios danificados	S	EP	MA	15	681,06
Captação	Entrada de água contaminada por meio de rachaduras, orifícios e equipamentos danificados	S	MP	MA	12	645,02

Captação	A área da base do mecanismo de bombeamento é permeável	PS	EP	B	5	645,02
Captação	Existência de outra fonte de poluição até 10 metros do poço	S	P	A	9	637,73
Captação	Variação sazonal da vazão do poço	S	P	M	9	637,73
Captação	Tubulações sujas	MS	MP	M	8	503,09
Usuário	Ambiente sujo próximo ao local de armazenamento e/ou armazenamento próximo ao solo	S	PP	A	6	503,09
Reservação	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	S	PP	M	6	503,09
Captação	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	S	PP	M	6	503,09
Captação	Entrada de animais por meio de tampas ou orifícios	MS	P	M	6	503,09
Captação	Limpeza e higiene inadequadas no poço	PS	EP	A	5	503,09
Captação	Presença de animais até 50 metros do poço	PS	EP	M	5	503,09
Reservação	Construção inadequada do reservatório	S	I	A	3	503,09
Usuário	Vazamento na torneira	MS	MP	MA	8	361,25
Reservação	Inundação da válvula por águas superficiais	S	PP	MA	6	361,25
Reservação	Acesso de animais ao reservatório	PS	EP	MA	5	361,25
Reservação	Drenagem insuficiente e acúmulo de água	MS	PP	A	4	310,41
Usuário	Utilização de recipiente sem tampa	PS	MP	A	4	219,51
Reservação	Presença de fezes de animais na tampa do reservatório	PS	P	M	3	219,51
Captação	Presença de água estagnada ao redor do poço, devido à má drenagem	PS	P	A	3	219,51
Captação	Presença de excrementos de animais ou humanos em torno do poço	PS	P	A	3	219,51
Captação	Presença de depósito de resíduos sólidos ao redor do poço	PS	P	M	3	219,51
Captação	Entrada de água contaminada durante inundações	PS	PP	M	2	219,51
Tratamento	Vandalismo (danificação de equipamentos ou obstrução de operação)	S	-	-	0	