



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRAULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (RECURSOS
HÍDRICOS)**

EDILSON HOLANDA COSTA FILHO

**REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA: CONTRIBUIÇÃO PARA UM MODELO DE APOIO À
DECISÃO**

**FORTALEZA/LISBOA
2025**

EDILSON HOLANDA COSTA FILHO

REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA: CONTRIBUIÇÃO PARA UM MODELO DE APOIO À
DECISÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, em cotutela com o Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Concentração: Saneamento Ambiental.

Orientadores: Prof. Dr. José Manuel de Saldanha Gonçalves Matos e Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

FORTALEZA/LISBOA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C871r Costa Filho, Edilson Holanda.

Reutilização de água : contribuição para um modelo de apoio à decisão / Edilson Holanda Costa Filho. – 2025.
227 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. José Manuel de Saldanha Gonçalves Matos e Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

1. Alterações climáticas. 2. Reutilização de água residual tratada. 3. Guia metodológico.
4. Método multicritério. 5. Apoio à decisão. I. Título.

CDD 628

EDILSON HOLANDA COSTA FILHO

REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA: CONTRIBUIÇÃO PARA UM MODELO DE APOIO À DECISÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, em cotutela com o Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 27/06/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manuel Guilherme Caras Altas Duarte Pinheiro (Presidente)
Universidade de Lisboa

Prof. Dr. Manuel de Saldanha Gonçalves Matos (Orientador)
Universidade de Lisboa

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Adriano Luiz Tonetti
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof.ª Dra. Leonor Miranda Monteiro do Amaral
Universidade Nova de Lisboa

Prof. Dr. António João Carvalho de Albuquerque
Universidade da Beira Interior

Prof.ª Dra. Filipa Maria Santos Ferreira
Universidade de Lisboa

Aos meus tios, Maria Adamir e Paulo
César, *in memoriam* desde 02/2021.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por simplesmente tudo.

Aos meus pais, Edilson e Zenir, pelo incentivo durante essa caminhada.

Aos professores José Saldanha e Ronaldo Stefanutti, pela confiança, pela orientação e pela paciência que tiveram comigo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amigo Ulisses de Oliveira Costa, pelos conhecimentos comigo partilhados. Obrigado pela paciência, pela humildade e pela dedicação que dispensastes a mim durante o desenvolvimento deste trabalho. Sem você eu não teria conseguido.

Ao meu amigo Alisson Oliveira, a quem eu devo muito dos conhecimentos sobre saneamento ambiental. Obrigado pela intermediação com a CAGECE.

Ao meu amigo e chefe Carlos Alberto. Obrigado pela compreensão, confiança e apoio durante minha estadia em Lisboa, Portugal.

A todos que de certa forma contribuíram, direta ou indiretamente, para a conquista de mais essa vitória, incluindo todos os colegas, professores e funcionários técnico-administrativos da Universidade de Lisboa e UFC.

RESUMO

Uma das consequências das alterações climáticas é a redução da disponibilidade hídrica, especialmente em regiões que já sofrem com baixa pluviometria, como o semiárido brasileiro. Entre as medidas de adaptação a essa realidade está a reutilização de água. Apesar dos vários casos de sucesso e das tecnologias de tratamento disponíveis, contudo, o percentual de reutilização ainda é baixo em termos mundiais. A dificuldade de implementação deve-se a diferentes aspectos, tais como aspectos técnicos, ambientais, sociais, políticos, econômicos, legislativos e climáticos locais. O objetivo da presente tese, portanto, foi desenvolver um modelo para apoiar a decisão de reutilização de água, contendo os indicadores e parâmetros relevantes para essa decisão. Pela revisão bibliográfica identificou-se 4 indicadores-chave (técnico, social, ambiental e econômico) e 12 parâmetros com influência direta na decisão de reutilização de água (segurança da ETAR, complexidade de transporte, existência de legislação, risco para saúde e para o ambiente, consumo de energia, grau de aceitação e de necessidade, universalização de coleta e tratamento, investimento necessário, encargos de operação e benefícios econômicos). O estudo realizado foi do tipo analítico-descritivo e investigação operacional para apoio à decisão. Foi utilizado o método multicritério Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) para determinação dos pesos dos diversos indicadores e parâmetros e posterior construção do modelo de apoio à decisão a partir do índice de viabilidade potencial de reutilização (IVR). O modelo desenvolvido foi aplicado à cidade de Aquiraz, Ceará, Brasil e o IVR encontrado foi de 81%, classificado como Muito Alta Viabilidade para fins agrícolas. Os resultados foram submetidos a uma análise de sensibilidade que indicou a consistência dos resultados do desempenho global obtido pelo método FAHP.

Palavras-chave: Alterações climáticas; Reutilização de água residual tratada; Guia metodológico; Método multicritério; Apoio à decisão.

ABSTRACT

One of the consequences of climate change is the reduction of water availability, especially in regions that already suffer from low rainfall, such as the Brazilian semi-arid region. Among the measures to adapt to this reality is the reuse of water. Despite several success stories and available treatment technologies, the percentage of water reuse is still low in global terms. The difficulty of implementation is due to aspects that must be considered, such as technical, environmental, social, political, economic, legislative and even local climate conditions. The objective of this thesis was to develop a model to support the decision for water reuse, containing the indicators and parameters relevant to this decision. The literature review identified 4 key indicators (technical, social, environmental and economic) and 12 parameters (WWTP safety, transport complexity, existence of legislation, risk to health and the environment, energy consumption, degree of acceptance and necessity, universal collection and treatment, necessary investment, operating costs and economic benefits) with direct influence on a decision for water reuse. The study carried out was analytical-descriptive and operational research to support decision-making. The multi-criteria Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) method was used to determine the weights of indicators and parameters and subsequent construction of the decision support model based on the potential reuse feasibility index (IVR). The developed model was applied to the city of Aquiraz, Ceará, Brazil and the IVR found was 81%, classified as Very High Viability for agriculture purpose. The results were subjected to a sensitivity analysis that indicated consistency of the global results obtained by the FAHP method.

Keywords: Climate change; Waste water reuse; Methodological guide; Multi-criteria method; Suport decision.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Ceará

CE – Condutividade elétrica

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos

COEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente

CQO – Carência Química de Oxigênio

CBO – Carência Bioquímica de Oxigênio

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais

GEE – Gases de efeito estufa

IST – Instituto Superior Técnico

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas

OD – Oxigênio dissolvido

pH – Potencial Hidrogeniônico

SDT – Sólidos dissolvidos totais

SST – Sólidos suspensos totais

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-	Grande consciência sanitária: 1850 a 1950. Fonte: Adaptado de (ASANO & LEVINE, 1996)	11
Figura 2.2-	Era da reutilização de água residual tratada: Pós 1960. Fonte: Adaptado de (ASANO & LEVINE, 1996)	12
Figura 2.3-	Mapa da crise hídrica no Brasil. Fonte: ANA (2017)	15
Figura 2.4-	Percentual de reutilização de água no mundo. Fonte: IRdA (2023)	30
Figura 3.1-	Componentes do estudo da análise de risco.....	49
Figura 3.2-	Esquema de uma avaliação de risco em projeto de reutilização de água residual tratada, adaptado de (ALBUQUERQUE; FERREIRA; MATOS, 2022).....	50
Figura 5.1-	Estrutura Hierárquica dos Indicadores e Parâmetros relacionados com a decisão de Reutilização de Água	82
Figura 5.2-	Análise de sensibilidade	108
Figura 6.1-	Índice municipal de alerta – 2023.....	111
Figura 6.2-	Mapa de localização do município de Aquiraz.....	112
Figura 6.3-	Mapa de localização dos empreendimentos localizados em Aquiraz e com outorga de uso de água vigente.....	114
Figura 6.4-	Demanda hídrica do município de Aquiraz, com base nas outorgas vigentes expedidas pela SRH.....	117
Figura 6.5-	Tipos de empreendimentos em Aquiraz passíveis de usar água residual tratada.....	118
Figura 6.6-	Esquema ilustrativo dos sistemas de esgotamento sanitário de Aquiraz.....	120
Figura 6.7-	Foto da entrada do efluente na lagoa anaeróbia.....	121
Figura 6.8-	Vista da lagoa anaeróbia.....	122
Figura 6.9-	Vista da lagoa facultativa.....	122
Figura 6.10-	Foto das lagoas de maturação	123
Figura 6.11-	Vista das lagoas de maturação	123
Figura 6.12-	Lagoa de maturação	124
Figura 6.13-	Ponto de coleta na lagoa de maturação	124
Figura 6.14-	Gráfico do tipo boxplot para a variável E. coli	129

Figura 6.15-	Gráfico do tipo boxplot para a variável condutividade elétrica	129
Figura 6.16-	Gráfico do tipo boxplot para a variável Ph	130
Figura 6.17-	Gráfico do tipo boxplot para a variável RAS	130
Figura 6.18-	Gráfico do tipo boxplot para a variável temperatura	131
Figura 6.19-	Faixa etária dos respondentes	146
Figura 6.20-	Percentual com conhecimento sobre o nível de escassez hídrica no Estado do Ceará	146
Figura 6.21-	Percentual com conhecimento sobre o nível de escassez hídrica no Estado do Ceará	147
Figura 6.22-	Percentual com conhecimento sobre o nível de escassez hídrica no Estado do Ceará	147
Figura 6.23-	Percentual com alguma preocupação quanto a relação “crescimento populacional urbano x disponibilidade hídrica”	147
Figura 6.24-	Percentual que afirmam que a cidade de Aquiraz tem enfrentado crise hídrica nos últimos 5-10 anos	148
Figura 6.25-	Percentual do setor econômico com crise hídrica nos últimos 5-10 anos	148
Figura 6.26-	Percentual de concordância com o uso de água residual tratada para alguma finalidade	149
Figura 6.27-	Percentual de concordância com o uso de água residual tratada para cada finalidade permitida pela resolução COEMA nº 02/2019	149
Figura 6.28-	Percentual que concorda com o cultivo de alimento com água residual tratada	149
Figura 6.29-	Percentual que concorda com o cultivo de peixe com água residual tratada	150
Figura 6.30-	Percentual que concorda com o uso de lago artificial com água residual tratada	150
Figura 6.31-	Percentual que concorda com a irrigação de jardins com água residual tratada	150
Figura 6.32-	Percentual que concorda com o combate a incêndio com água residual tratada	150

Figura 6.33-	Projeto de irrigação dentro da área da ETAR de Aquiraz ...	152
Figura 6.34-	Vista das áreas propostas para irrigação na área da ETAR	154
Figura 6.35-	Vista das áreas propostas para irrigação na área da ETAR	154
Figura 6.36-	Vista das áreas propostas para irrigação na área da ETAR	155
Figura 6.37-	Área próxima a ETAR com plantação de coqueiro	155
Figura 6.38-	Fazenda de cavalo, próxima a ETAR	155
Figura 6.39-	Área próxima a ETAR com plantação de banana	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1-	Padrão da água residual tratada para reutilização em rega em Portugal.....	40
Tabela 3.2-	Padrão da água residual tratada para reutilização em rega para proteção das culturas agrícolas, florestais e solo, em Portugal.....	41
Tabela 3.3-	Classes de rega para reutilização de água residual tratada em Portugal.....	41
Tabela 3.4-	Padrão da água residual tratada para reutilização em fins urbanos, em Portugal.....	42
Tabela 3.5-	Padrão da água residual tratada para reutilização na indústria, em Portugal (proteção para contato humano).....	42
Tabela 3.6-	Padrão da água residual tratada, de origem sanitária, para reutilização no Estado do Ceará.....	45
Tabela 3.7-	Barreiras que podem ser utilizadas para reduzir o risco para o ambiente e para saúde pública.....	54
Tabela 3.8-	Tipos de barreiras e barreiras-equivalentes para redução de carga microbiológica.....	55
Tabela 3.9-	Classes e Perigosidades.....	56
Tabela 3.10-	Classificação do risco para os usos previstos.....	56
Tabela 4.1-	Microrganismos patogênicos normalmente presentes nas águas residuais e doenças associadas.....	62
Tabela 4.2-	Meios de exposição relacionados a finalidade da reutilização da água	65
Tabela 4.3-	Avaliação das principais possibilidades de atenuação da escassez hídrica em termos de custo final da água e desafios e restrições	73
Tabela 5.1-	Diferenças entre os conjuntos clássicos e os conjuntos fuzzy.....	79
Tabela 5.2-	Escala fuzzy de nove pontos.....	84
Tabela 5.3-	Matriz de julgamento dos parâmetros do indicador técnico	85

Tabela 5.4-	Índice médio de consistência randômica. Fonte: (Gomes, 2009).....	87
Tabela 5.5-	Índice de Viabilidade Potencial de Reutilização de Água (IVR)	93
Tabela 5.6-	Constante do parâmetro “Complexidade de Transporte”	93
Tabela 5.7-	Constante do parâmetro “Segurança e Resiliência da ETAR”	93
Tabela 5.8-	Constante do parâmetro “Existência de Legislação”	94
Tabela 5.9-	Constante do parâmetro “Grau de Aceitação”	94
Tabela 5.10-	Constante do parâmetro “Grau de Necessidade”	95
Tabela 5.11-	Constante do parâmetro “Universalização da Coleta e Tratamento de Esgoto”	95
Tabela 5.12-	Constante do parâmetro “Risco para Saúde Pública”	95
Tabela 5.13-	Constante do parâmetro “Consumo de Energia na ETAR”	96
Tabela 5.14-	Constante do parâmetro “Risco para o Ambiente”	96
Tabela 5.15-	Constante do parâmetro “Investimento Necessário”	96
Tabela 5.16-	Constante do parâmetro “Encargos de Operação e Manutenção”	97
Tabela 5.17-	Constante do parâmetro “Benefícios Econômicos”.....	97
Tabela 5.18-	Julgamento dos parâmetros do indicador técnico pelo especialista 1	99
Tabela 5.19-	Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador técnico.....	100
Tabela 5.20-	Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador técnico (C1)	101
Tabela 5.21-	Matriz de julgamento Fuzzy para os parâmetros do indicador Técnico (C1)	101
Tabela 5.22-	Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador Técnico (C1).....	102

Tabela 5.23-	Cálculo do Zijl α para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.8	103
Tabela 5.24-	Cálculo do Zijr α para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.9	103
Tabela 5.25-	Matriz defuzificada para os parâmetros do indicador Técnico (C1), utilizando Zijl α a partir da equação 5.10 .	103
Tabela 5.26-	Peso Local dos Indicadores e Parâmetros.....	104
Tabela 5.27-	Peso Global dos Indicadores e Parâmetros	105
Tabela 5.28-	Resultado da análise de sensibilidade	108
Tabela 6.1-	Classes de Vulnerabilidades segundo o IMA 2023.....	111
Tabela 6.2-	Volume de água outorgado no município de Aquiraz, com base nas outorgas vigentes expedidas pela SRH .	116
Tabela 6.3-	Características de projeto da ETAR de Aquiraz	125
Tabela 6.4-	Estatística descritiva com base nos dados do Anexo 3, excluindo-se os outliers	131
Tabela 6.5-	Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov	134
Tabela 6.6-	Probabilidade Cumulativa	135
Tabela 6.7-	Coeficientes de variação e de confiabilidade	135
Tabela 6.8-	Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins urbanos, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.....	137
Tabela 6.9-	Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins de irrigação paisagística, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017	138
Tabela 6.10-	Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins ambientais, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.....	139
Tabela 6.11-	Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização na aquicultura, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.....	140
Tabela 6.12-	Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins agrícolas	

	(culturas consumidas cruas*), conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.....	141
Tabela 6.13-	Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins agrícolas (demais culturas), conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.....	142
Tabela 6.14-	Materiais e valores para irrigação por gotejamento	153
Tabela 6.15-	Índice de Viabilidade Potencial de Reutilização de Água em Aquiraz	159
Tabela 6.16-	Resultado da análise de sensibilidade para o IVR de Aquiraz	160
Tabela A1 -	Tipos de água e suas respectivas condutividades elétricas. Fonte: Almeida (2010).....	178
TABELA A4.1 –	Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para a comparação entre os indicadores.....	193
TABELA A4.2 –	Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador técnico.....	193
TABELA A4.3 –	Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador social.....	193
TABELA A4.4 –	Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador ambiental.....	194
TABELA A4.5 –	Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador econômico.....	194
TABELA A4.6 –	Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para as comparações dos indicadores.....	194
TABELA A4.7 –	Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador técnico.....	195

TABELA A4.8 –	Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador social.....	195
TABELA A4.9 –	Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador ambiental.....	196
TABELA A4.10 –	Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador econômico.....	196
Tabela A4.11 –	Etapa 4: Matriz de julgamento Fuzzy para as comparações dos indicadores, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas.....	196
Tabela A4.12 –	Etapa 4: Matriz de julgamento Fuzzy para os parâmetros do indicador técnico, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas.....	197
Tabela A4.13 –	Etapa 4: Matriz de julgamento Fuzzy para os parâmetros do indicador social, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas.....	197
Tabela A4.14 –	Etapa 4: Matriz de julgamento Fuzzy para os parâmetros do indicador ambiental, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas.....	197
Tabela A4.15 –	Etapa 4: Matriz de julgamento Fuzzy para os parâmetros do indicador econômico, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas.....	197
Tabela A4.16 –	Etapa 5: verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para a comparação dos indicadores.....	198
Tabela A4.17 –	Etapa 5: verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador técnico.....	198
Tabela A4.18 –	Etapa 5: Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador social...	198

Tabela A4.19 –	Etapa 5: Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador ambiental.....	199
Tabela A4.20 –	Etapa 5: Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador econômico.....	199
Tabela A4.21 –	Etapa 6: cálculo do $Zijl\alpha$ para os indicadores, a partir da equação 5.8.....	199
Tabela A4.22 –	Etapa 6: cálculo do $Zijl\alpha$ para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.8.....	199
Tabela A4.23 –	Etapa 6: cálculo do $Zijl\alpha$ para os parâmetros do indicador social, a partir da equação 5.8.....	200
Tabela A4.24 –	Etapa 6: cálculo do $Zijl\alpha$ para os parâmetros do indicador ambiental, a partir da equação 5.8.....	200
Tabela A4.25 –	Etapa 6: cálculo do $Zijl\alpha$ para os parâmetros do indicador econômico, a partir da equação 5.8.....	200
Tabela A4.26 –	Etapa 6: cálculo do $Zijr\alpha$ para os indicadores, a partir da equação 5.9.....	200
Tabela A4.27 –	Etapa 6: cálculo do $Zijr\alpha$ para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.9.....	200
Tabela A4.28 –	Etapa 6: cálculo do $Zijr\alpha$ para os parâmetros do indicador social, a partir da equação 5.9.....	201
Tabela A4.29 –	Etapa 6: cálculo do $Zijr\alpha$ para os parâmetros do indicador ambiental, a partir da equação 5.9.....	201
Tabela A4.30 –	Etapa 6: cálculo do $Zijr\alpha$ para os parâmetros do indicador econômico, a partir da equação 5.9.....	201
Tabela A4.31 –	Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os indicadores, a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11.....	201
Tabela A4.32 –	Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador técnico, utilizando $Zij\alpha\lambda$ a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11.....	202

Tabela A4.33 –	Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador social, utilizando Zijal a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11.....	202
Tabela A4.34 –	Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador ambiental, utilizando Zijal a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11.....	202
Tabela A4.35 –	Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador econômico, utilizando Zijal a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11.....	202
Tabela A4.36	Etapa 8: peso global a partir da equação 5.12.....	203

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕE GERAIS.....	1
1.2	OBJETIVO GERAL.....	5
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	5
1.4	QUESTÕES-CHAVE.....	5
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	6
2	REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA: ESTADO DA ARTE.....	8
2.1	CONTEXTO HISTÓRICO.....	8
2.2	RECURSOS HÍDRICOS X ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	12
2.2.1	Efeito estufa e o aumento da temperatura da terra.....	12
2.2.2	Efeito das alterações climáticas na disponibilidade hídrica.....	14
2.2.3	Mitigação e adaptação do setor da água às alterações climáticas.....	17
2.2.4	Adaptação do setor da água no nordeste do Brasil.....	21
2.2.5	Adaptação do setor da água em Portugal.....	24
2.3	PERSPECTIVAS DE REUTILIZAÇÃO.....	28
2.3.1	A reutilização de água e suas possibilidades.....	29
2.3.1.1	Reutilização para fins urbanos.....	32
2.3.1.2	Reutilização para fins industriais.....	33
2.3.1.3	Reutilização para fins agrícolas.....	34
2.3.1.4	Reutilização para fins de aquicultura.....	35
2.3.2	Desafios para reutilização de água.....	35
3	LEGISLAÇÃO SOBRE REUTILIZAÇÃO.....	39
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	39
3.2	LEGISLAÇÃO EM NÍVEL MUNDIAL.....	39
3.3	LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL.....	39
3.4	LEGISLAÇÃO NO BRASIL.....	42
3.5	AVALIAÇÃO E GESTÃO DO RISCO.....	47
3.5.1	Avaliação do risco para o ambiente e para a saúde pública.....	48
3.5.2	Gestão do risco.....	52

4	INDICADORES E PARÂMETROS RELACIONADOS COM A REUTILIZAÇÃO.....	58
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	58
4.2	INDICADOR TÉCNICO.....	59
4.3	INDICADOR AMBIENTAL.....	60
4.4	INDICADOR SOCIAL.....	67
4.5	INDICADOR ECONÔMICO.....	70
5.0	METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PESOS DOS INDICADORES E PARÂMETROS DO MODELO DE APOIO À DECISÃO.....	74
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	74
5.2	MODELO DE APOIO À DECISÃO.....	75
5.3	DETERMINAÇÃO DOS PESOS DOS INDICADORES E PARÂMETROS.....	80
5.3.1	Etapa 1: Desenvolvimento da estrutura hierárquica.....	80
5.3.2	Etapa 2: Obtenção dos julgamentos dos especialistas..	83
5.3.3	Etapa 3: Conversão dos julgamentos dos especialistas em números triangulares <i>fuzzy</i>	85
5.3.4	Etapa 4: Agregação dos julgamentos dos especialistas em uma matriz de julgamento <i>fuzzy</i>	86
5.3.5	Etapa 5: Verificação da consistência	86
5.3.6	Etapa 6: Defuzificação da matriz de julgamento.....	90
5.3.7	Etapa 7: Determinação dos pesos locais.....	92
5.3.8	Etapa 8: Determinação do peso global.....	92
5.4	MODELO DE APOIO À DECISÃO.....	92
5.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	97
5.6	EXEMPLO DE ATRIBUIÇÃO DE PESOS AOS DIVERSOS PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO.....	98
5.6.1	Etapa 1: Desenvolvimento da estrutura hierárquica.....	99
5.6.2	Etapa 2: Obtenção dos julgamentos dos especialistas..	99
5.6.3	Etapa 3: Conversão dos julgamentos dos especialistas em números triangulares <i>fuzzy</i>	100

5.6.4	Etapa 4: Agregação dos julgamentos dos especialistas em uma matriz de julgamento <i>fuzzy</i>.....	101
5.6.5	Etapa 5: Verificação da consistência	102
5.6.6	Etapa 6: Defuzificação da matriz de julgamento.....	103
5.6.7	Etapa 7: Determinação dos pesos locais.....	104
5.6.8	Etapa 8: Determinação do peso global.....	104
5.6.9	Modelo de apoio à decisão.....	105
5.6.10	Análise de sensibilidade.....	106
6	ESTUDO DE CASO NO BRASIL: APLICAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO AO SISTEMA DA ETAR DE AQUIRAZ	109
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	109
6.2	CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA E SÓCIOECONÔMICA DE AQUIRAZ.....	110
6.3	RECURSOS HÍDRICOS DA CIDADE DE AQUIRAZ.....	114
6.4	CARACTERÍSTICAS URBANAS E TENDÊNCIAS OCUPACIONAIS DE AQUIRAZ.....	115
6.5	DEMANDA HÍDRICA DE AQUIRAZ.....	116
6.6	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUAL TRATADA NA ETAR DE AQUIRAZ.....	118
6.6.1	Remoção de outliers.....	127
6.6.2	Estatística descritiva dos dados.....	131
6.6.3	Adoção de modelo de probabilidades.....	132
6.6.4	Cálculo da fiabilidade.....	134
6.6.5	Identificação e avaliação do risco.....	142
6.7	INQUÉRITO SOCIAL.....	145
6.8	ANÁLISE ECONÔMICA.....	151
6.9	DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE K DOS PARÂMETROS.....	156
6.9.1	Indicador técnico.....	156
6.9.2	Indicador ambiental.....	156
6.9.3	Indicador social.....	157
6.9.4	Indicador econômico.....	157
6.10	ÍNDICE DE VIABILIDADE POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO EM AQUIRAZ.....	159

7 SÍNTESE, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA	
PROSSEGUIMENTO DA INVESTIGAÇÃO.....	161
REFERÊNCIAS.....	165
ANEXO 1.....	178
ANEXO 2.....	187
ANEXO 3.....	191
ANEXO 4.....	193

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A escassez hídrica pode ser caracterizada como o consumo de água que se aproxima ou excede a capacidade natural de regeneração e/ou recarga de um corpo hídrico, seja por deficiência quantitativa ou qualitativa dos mananciais. Quanto maior a escassez, maior a competição pela água fresca em uma determinada região (Agência Nacional de Águas (ANA), 2017; Andrade *et al.*, 2020).

A questão da escassez hídrica se tornou uma preocupação global a partir da crescente demanda humana por água, principalmente para a agricultura irrigada e para áreas urbanas. A irrigação representa o maior consumidor de água no mundo, sendo responsável por 70% do consumo global, enquanto o consumo industrial representa cerca de 20% e o uso municipal 10% (Andrade *et al.*, 2019).

No Brasil, essa realidade é semelhante na medida em que a agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura são responsáveis por 77,6% do consumo de água, as indústrias de transformação e construção consomem cerca de 11,3% e usos domésticos/municipais consomem cerca de 7,4% (Gandra, 2018).

Em Portugal não é diferente. Segundo o Plano Nacional da Água, a agricultura e pecuária é responsável por cerca de 74% do consumo de água no país, seguido pelo setor urbano, com 20%, setor industrial, com 5% e o turismo, com 1% (“Plano Nacional da Água”, 2016).

De acordo com Andrade *et al.*, (2019), dois terços da população global, cerca de 4 bilhões de pessoas, vivem em condições de escassez severa de água pelo menos 1 mês durante o ano. Além disso, meio bilhão de pessoas no mundo enfrentam escassez de água severa durante o ano todo.

Essa situação é ainda mais agravada pelas alterações climáticas pelas quais o planeta Terra tem passado, cujas consequências para a sobrevivência mundial tem sido um dos temas mais discutidos tanto por leigos quanto pela comunidade científica. Mudança climática é definida como uma alteração no estado do clima que pode ser identificada por mudanças na média e/ou na variabilidade das suas propriedades e que persistem por extensos períodos, tipicamente décadas ou mais (normalmente 30 anos),

cujas causas podem ser naturais ou antropogênicas (Allen *et al.*, 2018). Tais mudanças se referem as consequências oriundas da modificação da composição da atmosfera (aumento da concentração de gases de efeito estufa – GEE), como a elevação da temperatura média do planeta à superfície, que por sua vez interfere no ciclo hidrológico, alterando a disponibilidade de água em diversas regiões do planeta (Filippini *et al.*, 2017; Godinho, 2015; Nobre, 2011; Souza; Corazza, 2017; Stocker *et al.*, 2013).

Segundo (Jiménez Cisneros *et al.*, 2014), as projeções das alterações climáticas mostram uma redução das fontes renováveis de recursos hídricos, tanto superficial quanto subterrânea, especialmente nas regiões subtropicais, com, aproximadamente, 7% da população mundial exposta a 20% menos fontes de água. Nos centros urbanos, o contínuo crescimento econômico, a urbanização e a globalização causaram um excessivo consumo de recursos tais como água, energia e comida. Especificamente sobre a disponibilidade hídrica, espera-se que a demanda global por esse recurso exceda a oferta em 40% nos próximos 20 anos (Gondhalekar; Al-azzawi; Drewes, 2019). Num cenário em que 54% da população mundial já vive em cidades atualmente, com expectativa de aumento para 66% em 2050 (UNRIC, 2016), espera-se que a pressão sobre os recursos hídricos aumente ainda mais.

A cidade de Lisboa é um exemplo de um sítio já bastante afetado pelas alterações climáticas, nomeadamente devido à subida do nível médio das águas do mar nas zonas baixas da cidade e ao possível aumento da frequência e magnitude dos fenômenos extremos de precipitação e seca. Aliado a isso, a crescente preocupação com a salubridade, aliada à criação de espaços e corredores verdes para usufruto da população, exerce ainda mais pressão sobre os recursos hídricos da cidade (Ferreira *et al.*, 2019).

No Brasil, a região nordeste sofre historicamente com a estiagem e os estudos sobre a influência das alterações climáticas nessa característica tem apresentado resultados preocupantes. O semiárido do Brasil é caracterizado pelo clima seco, com poucas chuvas, alto índice de aridez e elevada evapotranspiração (Andrade *et al.*, 2020).

Nos dias atuais, a escassez hídrica é um desafio que já afeta, aproximadamente, 40% da população mundial. A crescente importância da escassez dos recursos hídricos motivou as Nações Unidas a reconhecerem a disponibilidade

de água fresca e o gerenciamento sustentável da água e do saneamento para todos como um dos 17 objetivos do desenvolvimento sustentável, estabelecidos em 2015 (Alberich *et al.*, 2018).

Nesse cenário, é premente a adoção de medidas de mitigação (aqueles responsáveis pela estabilização da concentração de GEE) e adaptação (aqueles responsáveis por atenuar os efeitos mais gravosos para as sociedades humanas). No que concerne ao setor da água, as medidas de mitigação envolvem a adoção de tecnologias para reduzir as emissões de GEE associados, principalmente, aos processos de tratamento de águas residuais. Quanto a adaptação, pode-se citar as mudanças estruturais necessárias para manter os serviços de saneamento em pleno funcionamento diante dos eventos extremos de cheia e seca, e aquelas para manter a água em quantidade e qualidade demandadas pelas necessidades humanas e pelas mais diversas atividades econômicas.

A histórica variabilidade climática intrínseca ao clima semiárido do Nordeste brasileiro foi, por muito tempo, tomada como fator de desvantagem regional, o que levou aos governos a realizarem planejamentos para tentar mudar essa situação. A construção de grandes barragens (açudes), de canais para interligação de bacias hidrográficas, a articulação dos comitês de bacias hidrográficas, o programa de construção de cisternas para captação de água pluvial e o forte arcabouço legal envolvendo a matéria ambiental são exemplos de como a região Nordeste do Brasil tem usado da ferramenta da adaptação para melhorar sua resiliência frente as características naturais adversas e a intensificação de tal realidade frente as alterações climáticas.

Em um cenário de intensificação dos eventos de seca, parece que as ações tradicionais de adaptação adotadas pelos governos brasileiros precisam de atualização. É nesse contexto que a reutilização de água residual tratada tem ganhado destaque. A reutilização de água nas grandes cidades e regiões metropolitanas pode diminuir a necessidade de captação de água nos açudes que abastecem essas regiões, aumentando a disponibilidade de água para as regiões do interior dos Estados, além de contribuir com o paisagismo, diminuição das ilhas de calor, aumento da produtividade agrícola e fornecimento de uma fonte alternativa de água para as indústrias.

É essencial usar os recursos hídricos atualmente existentes de forma mais eficiente (reduzindo vazamentos e gerenciando a demanda, por exemplo) e encontrar

novas fontes de água. Embora haja alternativas como a dessalinização, uma das mais promissoras opções de suprimento de água é a sua reutilização, especialmente em áreas urbanas onde a maioria da população mundial está concentrada (Duong; Saphores, 2015).

A reutilização de água surge então como uma fonte alternativa confiável de água para as mais variadas finalidades, economizando água potável de alta qualidade e reduzindo o impacto ambiental pelo descarte de água residual em recursos hídricos superficiais (Alberich *et al.*, 2018; De Oliveira Marinho *et al.*, 2013; Narr *et al.*, 2019).

É cada vez mais inegável a importância e até mesmo a necessidade de investimentos em projetos de reutilização de água, de forma a adaptar os territórios a realidade irrefutável da redução da disponibilidade hídrica, uma vez que a água é um recurso natural indispensável à sobrevivência humana e à maioria das atividades econômicas. Apesar dos vários casos de sucesso e das tecnologias disponíveis, entretanto, o percentual de uso de água residual tratada ainda é baixo em termos mundiais (Gondhalekar; Al-azzawi; Drewes, 2019). Enquanto há países como Israel que reutilizam cerca de 90% do seu esgoto tratado, há países que só reutilizam cerca de 1,5%, como o Brasil (IRdA, 2023).

A dificuldade de implementação de um projeto de reutilização de água residual tratada deve-se aos vários aspectos que devem ser considerados, tais como critérios técnicos, ambientais, sociais, políticos, econômicos, legislativo e até meteorológicos locais, conforme relata (Hidalgo *et al.*, 2007). Sendo assim, são importantes as pesquisas científicas que investiguem as barreiras e potencialidades da reutilização de água residual tratada em determinado local, especialmente naqueles onde a escassez hídrica já é uma realidade, buscando oferecer um produto prático de aplicação expedita, que possa apoiar a decisão de implementação ou não da reutilização de água para finalidades compatíveis.

Um modelo de apoio à decisão incluindo indicadores e parâmetros, e seus respectivos pesos, de forma a apresentar um quadro indicativo da viabilidade técnica, social, ambiental e econômica da reutilização numa cidade, apresenta-se como uma ferramenta de grande valia para ajudar o fortalecimento do uso dessa fonte alternativa de água. A partir da aplicação do modelo, pretende-se que seja possível avaliar, logo na fase inicial do projeto, se a implementação de um programa de reutilização de água

residual tratada numa determinada cidade é econômica, técnica, social e ambientalmente viável.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente tese é desenvolver uma metodologia para apoiar a decisão de reutilização de água, contendo os indicadores e parâmetros relevantes para essa decisão.

O modelo matemático obtido tem de levar em consideração as variáveis relacionadas com a reutilização, de forma a refletir, verdadeiramente, a realidade de que depende uma decisão pela reutilização.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo específico é ter um estudo de caso para demonstrar e validar a aplicação da metodologia. Para tanto, escolheu-se a cidade de Aquiraz, pertencente à Região Metropolitana de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, Brasil.

Para o teste e validação do modelo, a cidade de Aquiraz apresenta-se como promissora, face a escassez de recursos hídricos enfrentada pelo Estado do Ceará, Brasil, grande potencial da agricultura e aquicultura na região metropolitana e existência de diversas indústrias nas proximidades da cidade.

O regime de chuvas da bacia hidrográfica da Região Metropolitana de Fortaleza, onde está inserida a cidade de Aquiraz, é caracterizado pela ocorrência de uma marcada estação seca, pelas irregularidades interanuais e pela alta variabilidade espacial das chuvas ao longo da bacia. O regime de chuvas é concentrado em poucos meses, o que torna a estação chuvosa bem definida, com máxima precipitação durante os meses de fevereiro e abril (Governo do Estado do Ceará, 2017). Segundo Andrade *et al.*, (2020), a bacia metropolitana apresenta uma alta escassez hídrica durante o ano.

1.4 QUESTÕES-CHAVE

O objeto de estudo da presente tese é a reutilização de água, identificando suas barreiras e potencialidades, e revelando os indicadores e parâmetros relevantes, de forma a produzir um modelo de apoio à decisão de reutilização.

Para tanto, algumas questões-chave precisam ser respondidas, tais como:

- Quais são os indicadores e parâmetros relevantes para um modelo de apoio à decisão de reutilização?
- Quais os valores aceitáveis para esses parâmetros e indicadores?

Após respondidas essas questões, será feita a aplicação do modelo de apoio à decisão, incluindo a avaliação de disponibilidades, os consumos e os investimentos e encargos necessários para um sistema de reutilização de água, num estudo de caso.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Na sequência desse capítulo introdutório, a presente tese integra 7 capítulos, adiante sumariamente descritos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte do tema da presente tese. Inicialmente procura-se contextualizar a reutilização de água, seguindo com uma apresentação da sua relação com as alterações climáticas e as medidas de adaptação do setor de recursos hídricos. Por fim, apresenta-se as modalidades de reutilização de água residual tratada e as dificuldades e perspectivas dessa prática.

No capítulo 3 é apresentada legislação sobre reutilização de água, em termos mundiais, com ênfase para Portugal e Brasil. Nesse capítulo também é apresentada a metodologia de gestão de risco, presente na legislação portuguesa.

No capítulo 4 são apresentados os indicadores e parâmetros relacionados com uma decisão de reutilização de água, com base na revisão bibliográfica dos capítulos 2 e 3.

No capítulo 5 é apresentada a metodologia utilizada na construção do modelo de apoio à decisão. Nesse capítulo é apresentada uma breve descrição sobre os modelos multicritérios e as etapas seguidas para determinação dos pesos dos indicadores e parâmetros definidos no capítulo 4. No capítulo 5 também são apresentados os resultados da aplicação da metodologia para determinação dos pesos dos indicadores e dos parâmetros e concebido e desenvolvido o modelo de apoio à decisão.

No capítulo 6 procede-se à aplicação do modelo a um estudo de caso, qual seja: a verificação da viabilidade de reutilização de água na cidade de Aquiraz, região semiárida do Brasil.

No capítulo 7 é apresentada uma síntese, as conclusões e sugestões para prosseguimento da investigação.

2. REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA: ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem a finalidade de levantar o estado da arte inserido no contexto deste projeto e visa identificar as lacunas que devem ser preenchidas com esse trabalho. Inicialmente, procura-se contextualizar a reutilização de água, seguindo-se a sua relação com as alterações climáticas e as medidas de adaptação do setor de recursos hídricos. Por fim, apresentam-se as modalidades de reutilização, as dificuldades e perspectivas dessa prática e os indicadores e parâmetros relacionados.

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Historicamente, o homem vem utilizando práticas de saneamento, eficientes ou não, com o objetivo de obter água para as suas mais diversas necessidades e afastar o esgoto, livrando-se dos maus odores e das doenças contraídas pelo contato com a água contaminada. A reutilização do efluente, tratado ou não, também vem sendo utilizada pelas civilizações, de forma consciente ou não.

A reutilização de águas residuais remonta às construções dos sistemas de esgotamento dos palácios e das cidades antigas da Civilização Minóica, na Ilha de Creta, na Grécia Antiga, de 3.000 a 1.200 a.C., que reutilizavam os esgotos gerados, sem tratamento, para produção agrícola à, aproximadamente, 5.000 anos. Na história mais recente, em Londres, durante o século XIX, o lançamento em larga escala de esgotos não tratados nos mananciais superficiais, conduziu a um inadvertido e indireto uso de águas residuárias na produção de água para consumo humano. Esse reuso não planejado associado ao tratamento inadequado dos efluentes originou epidemias catastróficas de doenças veiculadas pela água como a cólera asiática e a febre tifoide, entre os anos de 1840 e 1850 (Goellner, 2010).

Essa prática realizada em Londres no século XIX é ainda comum na atualidade, em várias regiões do mundo, com a diferença que se desenvolveu, entretanto, legislação que só permite o lançamento de efluentes em recursos hídricos após tratamento adequado, de forma a não comprometer a qualidade do corpo receptor e os seus usos atuais ou potenciais.

Infelizmente, entretanto, o volume de esgoto não tratado que ainda acaba atingido os recursos hídricos é muito alto, configurando-se em uma reutilização indireta e perigosa. Em 2019, por exemplo, o percentual de tratamento de esgoto no Brasil era

de 49,1%, indicando que, nacionalmente, mais da metade dos esgotos gerados são descartados no meio ambiente de forma *in natura* (Brasil, 2020).

Especificamente sobre a reutilização, percebendo que essa pode ser uma prática viável, os Estados Unidos da América, no início do século XX, começaram a fazer a reutilização de forma planejada, controlada, promulgando as primeiras regulamentações em 1918, na Califórnia. Os primeiros sistemas de reutilização foram desenvolvidos para prover água para irrigação nos estados do Arizona e Califórnia, no final de 1920. Em 1940, efluente tratado passou a ser usado em siderúrgicas e a partir de 1960 foram desenvolvidos sistemas de reutilização pública urbana no Colorado e na Flórida (Asano; Levine, 1996; Goellner, 2010).

Em 1968, foram conduzidas pesquisas extensivas em reuso potável direto, em Windhoek, na Namíbia. Segundo (Goellner, 2010), esse é o primeiro caso de reutilização potável direta divulgada. Houve um período em que até um terço do abastecimento da cidade era composto por água de reuso. É importante mencionar que esse projeto foi planejado e a escassez de água não permitiu outra solução e que, aparentemente, tem operado com sucesso e sem objeções de maior parte do público (Goellner, 2010).

Durante o último quarto do século XX, os benefícios de promover a reutilização de água residual tratada como meio de suplementar as fontes naturais foram reconhecidos pela maioria dos estados americanos, assim como pela União Europeia. Por exemplo, em 1970 o Estado da Califórnia declarou a sua intenção em encorajar o desenvolvimento de estações de tratamento de águas residuais de forma a tornar a reutilização disponível e viável para ajudar na sustentabilidade do fornecimento de água face à crescente demanda. No mesmo contexto, a Comunidade Europeia declarou que o esgoto tratado deve ser reutilizado sempre que apropriado e que as formas de disposição devem minimizar os efeitos adversos ao meio ambiente (Asano; Levine, 1996).

Ainda na década de 70, mais precisamente em 1971, o congresso americano aprovou o Federal Water Pollution Control ACT (PL 92-500), para restaurar e manter a integridade física, química e biológica das águas do país, com o objetivo principal de eliminar a descarga de poluentes em águas usadas para navegação, pesca e recreação. Nos anos seguintes, em várias regiões, foram elaborados estudos com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre os riscos para a saúde e os requisitos tecnológicos

necessários para a reutilização potável e não potável, resultando, por exemplo, na publicação do Guia para Reuso de Água, em 1992, pela Agência Ambiental Americana – USEPA (Goellner, 2010).

É possível observar que a reutilização desponta, na segunda metade do século XX, como uma alternativa as fontes naturais e tradicionais de água, em consequência do aumento da demanda, devido ao elevado crescimento populacional, especialmente nos centros urbanos. Como será possível constatar nos capítulos seguintes dessa tese, o aumento da população mundial, a urbanização, a industrialização e, consequentemente, as alterações climáticas, foram e são os grandes impulsionadores da disseminação e desenvolvimento da reutilização segura de água residual tratada.

O interesse e, principalmente, a necessidade de se reutilizar água faz surgir uma obrigação: desenvolver tecnologias de tratamento de esgoto que garantam a segurança de sua reutilização, em termos ambientais e de saúde pública. Atualmente, já existe tecnologia para produzir efluente praticamente de qualquer qualidade. Obviamente, os custos do tratamento estão diretamente relacionados com a qualidade requerida. A reutilização da água tem evoluído no sentido de se tornar um fator integral na promoção do planejamento ideal e do uso eficiente dos recursos hídricos (Asano; Levine, 1996).

Nas Figuras 2.1 e 2.2 são apresentados eventos marcantes na evolução da reutilização de água residual tratada. Avanços microbiológicos no final do século XIX fizeram surgir a grande consciência sanitária e o advento dos processos de desinfecção. O desenvolvimento dos processos de lodos ativados em 1904 foi uma etapa significativa para o melhoramento dos tratamentos de esgoto e controle da poluição, e para o desenvolvimento dos sistemas de tratamento biológicos. Em 1918, a secretaria de saúde pública do estado da Califórnia, nos Estados Unidos da América, editaram a primeira regulamentação tratando do uso de esgoto na irrigação (Asano; Levine, 1996).

Os avanços tecnológicos em processos de tratamento físicos, químicos e biológicos de água e esgoto durante o início do século XX levaram à “Era da Reutilização de Água Residual Tratada”. Desde a década de 60, intensas pesquisas, alimentadas por pressões legislativas e escassez hídrica, forneceram valiosos conhecimentos relacionados com os riscos para a saúde e conceção das estações de tratamento para produção de água de reuso. Em 1965, o Ministério da Saúde de Israel editou

regulamentações que permitem o reuso de efluente, resultante de tratamento secundário, na irrigação, exceto para cultura de alimentos consumidos cru. Em 1968, foram conduzidas na Namíbia extensas pesquisas para a reutilização potável direta.

O intenso desenvolvimento tecnológico que se seguiu a partir da segunda metade do século XX, em termos de tecnologia de tratamento de efluentes, ajudou a superar muitas barreiras técnicas para a implementação de projetos de reuso seguro. Melhoras nos processos de tratamento, avaliação de risco e a confiança pública em sistemas de reutilização, em conjunto com o aumento da demanda e a crescente edição de legislações relacionadas com o controle da poluição, promoveram uma integração da reutilização de água residual tratada com a gestão dos recursos hídricos (Asano; Levine, 1996). É importante reconhecer, no entanto, que a aceitação pública de projetos de reutilização é vital para o seu sucesso. Uma baixa adesão do público-alvo é uma das razões do fracasso de muitos projetos de reutilização de água residual tratada, como será explicitado nos tópicos seguintes desta tese. Na Figura 2.1 apresentam-se marcos de evolução da consciência sanitária e na Figura 2.2 apresenta-se a cronologia da prática de reutilização de água.

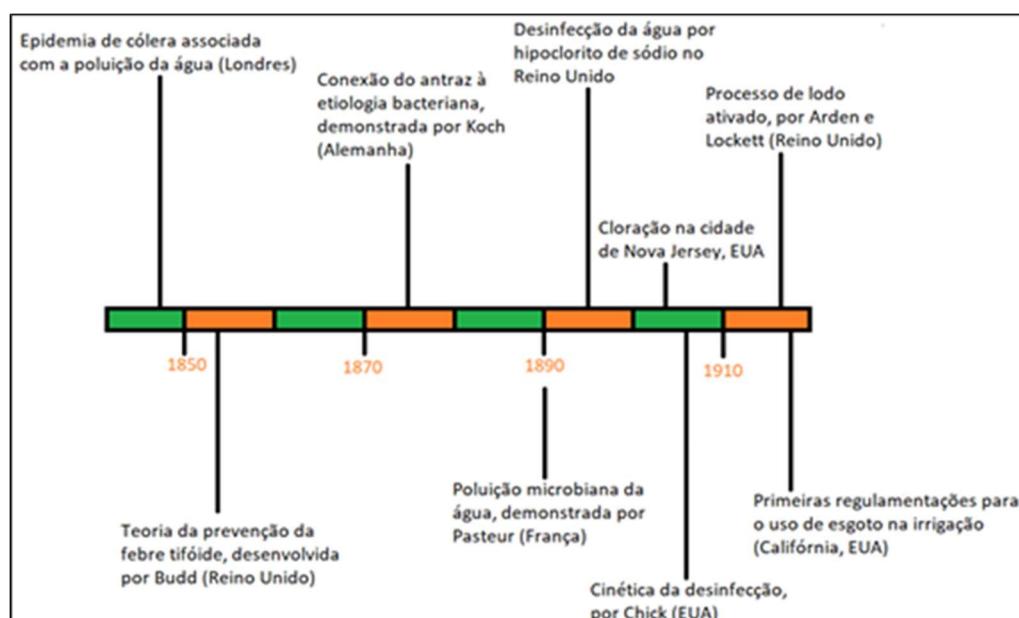


Figura 2.1 - Grande consciência sanitária: 1850 a 1950. Fonte: Adaptada de (Asano & Levine, 1996)

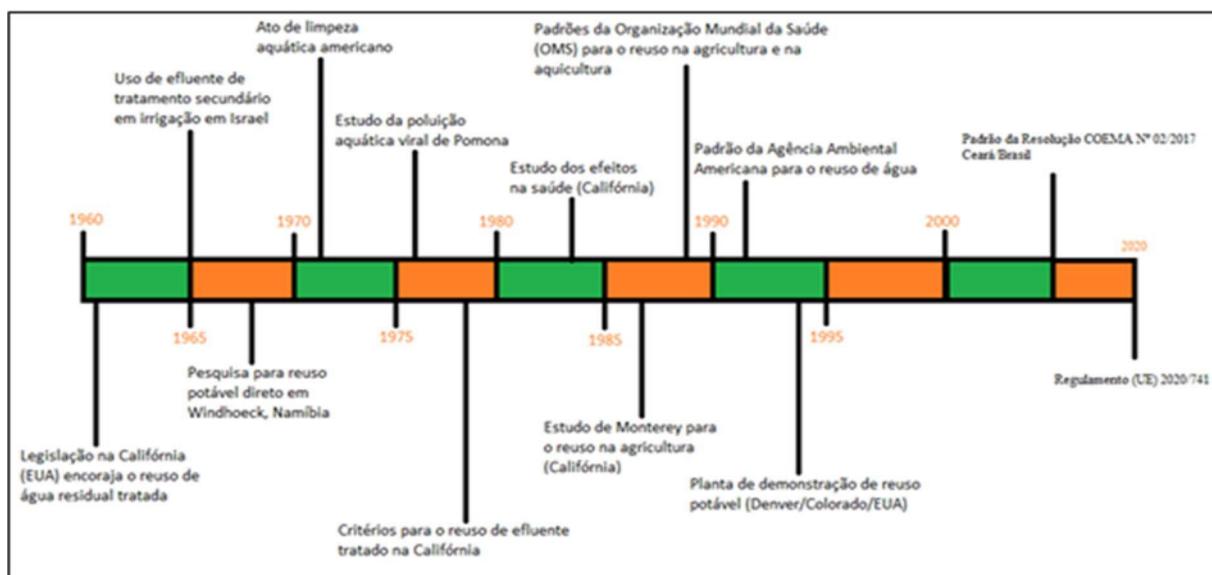


Figura 2.2 - Era da reutilização de água residual tratada: Pós 1960. Fonte: Adaptada de (Asano & Levine, 1996)

2.2 RECURSOS HÍDRICOS X ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

A reutilização de água residual tratada é uma prática que vem sendo utilizada em vários países em todo o mundo, inserindo-se no gerenciamento dos recursos hídricos como uma fonte suplementar ou alternativa às fontes naturais de abastecimento de água.

Em termos de gestão hídrica, o que tem impulsionado a prática da reutilização recentemente é a pressão que as alterações climáticas exercem sobre os recursos hídricos, nomeadamente na sua disponibilidade para atender demandas crescentes.

Para entender melhor a relação entre mudanças climáticas e recursos hídricos, analisa-se essa problemática que tem assolado e assustado a sociedade, especialmente nas regiões que sofrem historicamente com secas.

2.2.1 Efeito estufa e o aumento da temperatura da terra

O aquecimento do sistema climático é indiscutível e, desde 1950, muitas das mudanças observadas não têm precedentes em séculos anteriores. A atmosfera e o oceano aqueceram, a quantidade de neve e gelo diminuiu, o nível do mar subiu e a concentração de gases com efeito estufa na atmosfera aumentou. As últimas três décadas foram sucessivamente mais quentes à superfície da terra quando comparada com as décadas anteriores desde 1850. No Hemisfério Norte, por exemplo, o período de

trinta anos entre 1983 e 2012 foi, provavelmente, o mais quente dos últimos 1.400 anos (Intergovernamental Panel on Climate Change [IPCC], 2013)

Todas essas mudanças pelas quais o sistema climático tem passado nos últimos séculos, segundo a grande maioria dos cientistas, têm uma causa comum: o aumento da concentração dos gases com efeito estufa na atmosfera (GEE).

Para entender melhor a importância dos GEE na atmosfera e a preocupação com o aumento da sua concentração, é relevante esclarecer que a atmosfera constitui a camada gasosa da terra, formada por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases, sendo a maior parte de gás carbônico (CO₂). O CO₂ é um gás com efeito estufa, isto é, tem a capacidade de absorver a radiação infravermelha emitida pela superfície da terra aquecida pelo sol e reemitir parte dessa radiação de volta para a superfície da terra. Isso é o que se denomina de efeito estufa natural e é o que mantém uma temperatura ideal que permite o desenvolvimento da vida no nosso planeta. Caso a atmosfera não possuísse gases com essa capacidade, a radiação infravermelha seria totalmente perdida para o espaço sideral e o planeta perderia calor, resfriando-se, gerando um ambiente não apropriado a vida, pelo menos para muitos dos seres vivos existentes (Peixoto; Oort, 1992).

Nos últimos séculos, entretanto, mais precisamente desde a revolução industrial, no século XVIII, a concentração de GEE na atmosfera (não só de CO₂ mas também outros gases, dentre eles o metano) tem aumentado, intensificando o efeito de estufa e, consequentemente, aumentando a temperatura média global da Terra à superfície. A relação com a revolução industrial acontece porque foi a partir desse período que se iniciou o uso intensivo da queima de combustíveis fósseis, cujo resultado é a emissão de GEE para a atmosfera. O aumento da concentração desses gases engrossa a camada da atmosfera a ponto de não permitir que uma parte da radiação infravermelha passe pela atmosfera e se perca no espaço (da radiação infravermelha que a superfície da terra aquecida emite, uma parte é absorvida pelos gases de efeito estufa e reemitida à superfície e uma parte atravessa a atmosfera e se perde no espaço). Dessa forma, não havendo ou diminuindo a parcela da radiação infravermelha que vai para o espaço, a quantidade de radiação que é absorvida e reemitida pelos GEE aumenta. Logo, a temperatura à superfície aumenta (Filippini *et al.*, 2017; Godinho, 2015; Intergovernamental Panel on Climate Change [IPCC], 2013; Nobre, 2011; Souza & Corazza, 2017).

Não havendo mais dúvidas sobre o aumento da temperatura do planeta Terra à superfície, é com as consequências desse efeito que a comunidade científica e a sociedade em geral estão preocupadas. Surge então o fenômeno das alterações climáticas, que pode ser definido como uma alteração no sistema climático, em consequência, por exemplo, do aumento da temperatura da Terra que, por sua vez, é oriunda do aumento da concentração de gases com efeito de estufa. Segundo (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013), mudança climática refere-se a uma mudança no estado do clima que pode ser identificada por uma alteração na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, e que persistem por um período de tempo longo, normalmente décadas ou séculos.

É por conta dessa preocupação que ao longo da última década as alterações climáticas têm constituído um dos grandes temas de discussão da comunidade científica ligada às ciências da terra, das ciências sociais e engenharia. O debate sobre as medidas suscetíveis de influenciar positivamente as variáveis associadas ao fenômeno das alterações climáticas (mitigação) e sobre as medidas que poderão atenuar os seus efeitos mais gravosos para as sociedades humanas (adaptação) tem hoje um lugar cimeiro na agenda política europeia e mundial, e a reutilização de água residual tratada, como será visto mais adiante, insere-se como uma das medidas de adaptação às alterações climáticas relacionadas com a gestão dos recursos hídricos (Alcoforado *et al.*, 2009).

2.2.2 Efeito das alterações climáticas na disponibilidade hídrica

Segundo (Luís & Cruz, 2014), já existe um consenso científico de que as mudanças no sistema climático provocadas pela intensificação antropogênica do efeito estufa se irão agravar ao longo do século XXI, e um dos setores mais vulneráveis é o dos recursos hídricos.

O volume total de água do planeta que está disponível para o consumo depende, em primeiro lugar, do seu clima (precipitação atmosférica, temperatura e evapotranspiração) e também da eventual afluência de água proveniente de bacias hidrográficas, que podem ser partilhadas com outros países (Monte; Albuquerque, 2010).

Especificamente sobre a pluviometria e a influência por ela sofrida em consequência das alterações climáticas, a região Nordeste do Brasil merece atenção pelo histórico de seca. Segundo (Nobre, 2011), observou-se um aumento de 4 °C na

temperatura máxima diária no período de 1961 a 2009, e diminuição média de 275 mm (correspondendo a 57%) dos totais pluviométricos anuais no vale do rio Pajeú, no Estado de Pernambuco, nordeste brasileiro. Na Figura 2.3 apresenta-se o mapa das vulnerabilidades hídricas do Brasil, onde é possível observar que a região Nordeste é a mais vulnerável.

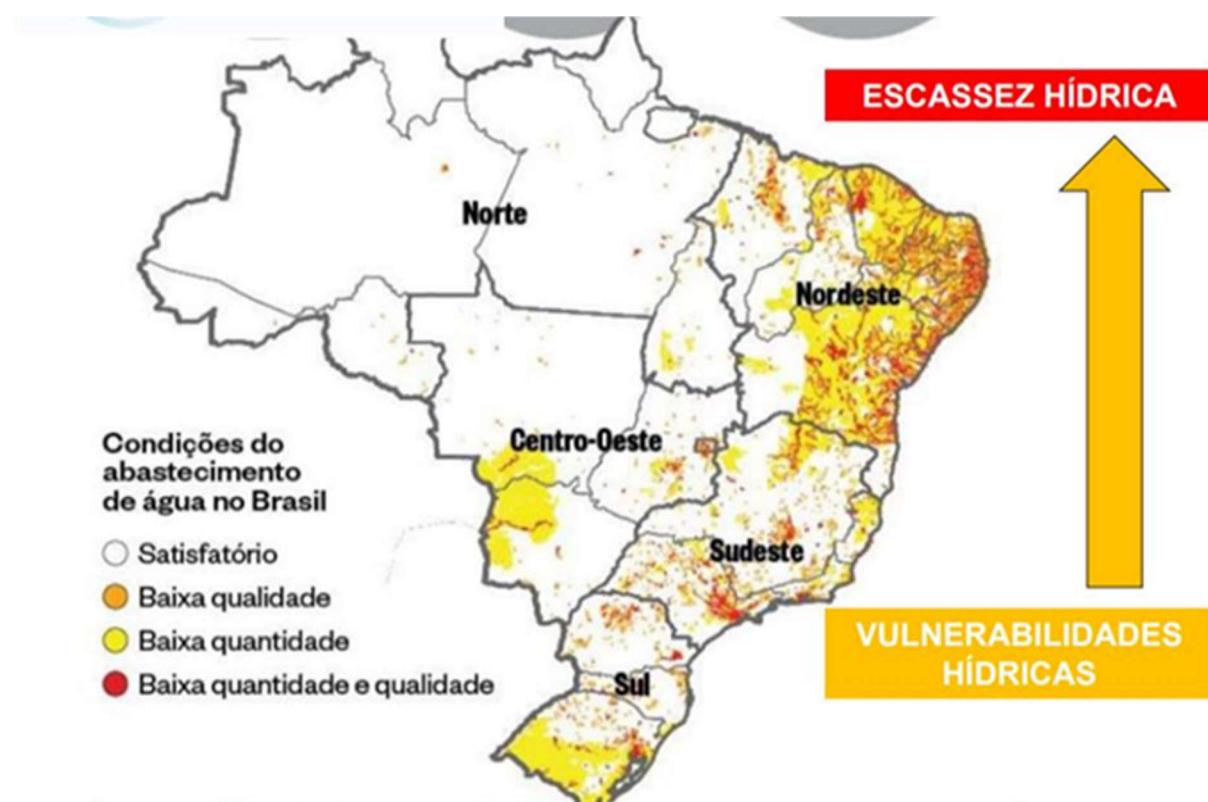


Figura 2.3 – Mapa da crise hídrica no Brasil. Fonte: ANA (2017)

Já nos países do sul da Europa, por exemplo, nos últimos 40 anos observou-se uma ligeira tendência de diminuição da precipitação média anual e uma tendência mais clara de aumento da variabilidade da precipitação acumulada no inverno, com maior frequência tanto de invernos muito secos como de invernos muito chuvosos. As projeções até o final do século XXI, obtidas a partir dos vários modelos climáticos globais disponíveis, são concordantes no que se refere a uma intensificação das tendências referidas (Luís; Cruz, 2014).

Além da questão climática, a disponibilidade hídrica também tem relação com o aumento da densidade demográfica. O homem alterou como nenhuma outra espécie a configuração geral do planeta, provocando mudanças topográficas, biológicas e climáticas, algumas das quais estão pondo em risco a sua própria sobrevivência. Um dos exemplos da influência da ação humana no equilíbrio do planeta são as mudanças

climáticas provocadas pelo aumento da temperatura média da Terra, o chamado aquecimento global, cujas causas estão relacionadas principalmente com a queima de combustíveis fósseis e com o desmatamento, que aumentam as concentrações dos gases do efeito estufa na atmosfera (Fundação Nacional de Saúde, 2019).

Além das modificações que o homem tem provocado no planeta, contribuindo para as alterações climáticas, o próprio aumento populacional impacta o setor da água na medida em que cresce a demanda e a produção de esgoto, que por sua vez influencia na qualidade dos corpos receptores, muitos deles fontes de captação. Essas características negativas, entretanto, podem ser amenizadas por algumas medidas de adaptação e a reutilização de água residual tratada é uma delas.

Um dos principais recursos naturais do planeta, a água, indispensável para sobrevivência dos seres vivos, é afetado pelas alterações climáticas. Para entender melhor a influência da elevação da temperatura do planeta no setor da água, (Carmo, 2013) explica que tudo está relacionado com a radiação solar no ciclo hidrológico, do qual fazem parte a evaporação, a precipitação, a infiltração e o escoamento superficial. À medida que aumenta a concentração de GEE na atmosfera, fica mais energia disponível à superfície do planeta e como consequência, verifica-se uma intensificação do ciclo hidrológico, o que eleva a frequência e intensidade de fenômenos extremos, inclusive situações de seca prolongada e de inundações.

Nos centros urbanos, por sua vez, devido a elevada densidade populacional, o alto grau de impermeabilização, a falta de um eficiente sistema de drenagem de águas pluviais e de coleta e tratamento de esgotos, as consequências das alterações climáticas são ainda mais graves em decorrência, dentre outros, do aumento dos eventos de inundaçāo. De acordo com (Jiménez Cisneros *et al.*, 2014), espera-se que os riscos de inundaçāo aumentem de forma significativa em partes do Sul, Sudeste e Nordeste da Ásia, na África tropical e na América do Sul.

No âmbito do ciclo hidrológico, a precipitação alimenta o solo com água, a partir do qual uma parcela infiltra, alimentando os aquíferos, e outra escoa, atingindo os rios, lagos e oceanos. A evapotranspiração dos solos, plantas, rios, lagos e oceanos alimenta a atmosfera com vapor d'água que precipitará em forma de chuva, completando o ciclo natural da água.

Há, entretanto, um ciclo “artificial” da água, conhecido como o ciclo urbano, que consiste na inserção, no ciclo natural, das águas residuais (Pompēo, 2000). A água

captada nos rios, lagos, oceanos e aquíferos é tratada e distribuída à população. Após a utilização, são gerados os efluentes, os quais são tratados antes do lançamento no oceano ou nos recursos hídricos superficiais ou no solo.

Ao analisar o ciclo da água percebe-se o quanto ele está suscetível às alterações climáticas. No que concerne ao ciclo urbano, especificamente, essa susceptibilidade é ainda maior. Nas áreas urbanas, os efeitos das alterações climáticas podem ser agravados pelas características próprias das cidades e pelas atividades antrópicas, que alteram a composição da atmosfera e o comportamento das variáveis meteorológicas, como a radiação, a temperatura, a circulação do ar e a precipitação. Por esta razão e também devido à elevada concentração de pessoas, infraestruturas e atividades, as áreas urbanas são particularmente vulneráveis aos efeitos das alterações climáticas (Alcoforado *et al.*, 2009).

No que concerne ao tratamento de efluentes, considerando tratar-se de água contaminada, a variabilidade da quantidade e da qualidade desse líquido interfere diretamente na eficiência desses sistemas, que também contribuem para as emissões de GEE, principalmente com gás carbônico (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), que são liberados durante as várias operações de tratamento. Além das emissões diretas, importa ainda considerar as emissões indiretas de GEE associadas ao consumo de energia, decorrente da queima de combustíveis fosseis e de outras emissões indiretas relacionadas com a produção e transporte dos produtos químicos, transporte e destino de lamas e dos subprodutos do tratamento (Carmo, 2013; Rutkowski; Sanches-pereira, 2009).

Dessa forma, considerando a importância do saneamento básico, principalmente porque envolve um recurso natural indispensável à vida, a água, é imprescindível que a iniciativa privada e o setor público comecem desde já a projetar e implementar as medidas necessárias para tornar esse setor mais sustentável.

2.2.3 Mitigação e adaptação do setor da água às alterações climáticas

Mitigar e adaptar, num contexto de alterações climáticas, remete ao conceito de sustentabilidade. Para uma melhor compreensão do tema, é preciso entender o significado de um planeta sustentável. A ideia de sustentabilidade pode ser compreendida como a condição daquilo que se pode sustentar, conforme se averigua no dicionário Aurélio da Língua Portuguesa. A partir daí, pensando nas condições do

planeta e no contexto do meio ambiente, pode-se então entender sustentabilidade como o meio pelo qual se pode sustentar a vida, ou melhor, garantir as condições de sobrevivência da vida no Planeta Terra (Tybusch *et al.*, 2016).

Aplicando o conceito de sustentabilidade à utilização dos recursos hídricos, pode-se entender como a otimização dos benefícios decorrentes do uso no presente, sem pôr em risco a possibilidade de as gerações futuras poderem dispor de benefícios análogos. Em termos práticos, a gestão sustentável dos recursos hídricos deve procurar respostas para questões como: Até quando teremos água em quantidade e qualidade necessárias para sobrevivência humana e qualidade de vida? Como gerir a demanda e a conservação do meio ambiente? Como evitar as consequências desastrosas da escassez de água que ameaçam áreas cada vez mais extensas (Monte; Albuquerque, 2010)?

Nesse momento, cabe aqui explicar a diferença entre mitigação e adaptação. A mitigação é definida pelo (Intergovernamental Panel on Climate Change [IPCC], 2007) como uma intervenção para reduzir o “forçamento” antrópico do sistema climático. Inclui estratégias para limitar as fontes de emissão de GEE e aumentar os respectivos “sumidouros” (estruturas naturais ou tecnológicas capazes de absorver gás carbônico).

Os esforços globais de mitigação são determinantes para afastar os impactos mais catastróficos das alterações climáticas – evitar aquilo que não se pode gerir. No entanto, mesmo que as emissões de GEE estabilizassem hoje, a dinâmica de transformação, alimentada pelas emissões passadas, já está em marcha, e trazem inevitavelmente ameaças à vida, ao patrimônio e à posteridade. É nesse contexto que se insere a adaptação, consistindo num ajuste nos sistemas naturais e humanos, como resposta aos estímulos climáticos atuais ou esperados e seus efeitos, limitando as perdas e prejuízos e explorando as oportunidades das alterações climáticas: gerir aquilo que não se pode evitar (Alcoforado *et al.*, 2009).

Nessa perspectiva, descrevem-se a seguir as principais formas conhecidas para mitigação e adaptação do ciclo urbano da água às alterações climáticas, nomeadamente no que se refere a vertente dos sistemas de tratamento de efluentes, a partir dos quais se obtém a matéria-prima objeto da presente tese.

Os sistemas de tratamento de águas residuais, embora não sejam a principal fonte de GEE, (Carmo, 2013) considera importante o controle de emissões desse setor,

tendo em vista a crescente preocupação com as alterações climáticas, aos tratados internacionais e à maior exigência na regulação das emissões.

Em Portugal, por exemplo, no ano de 2010, as águas residuais representaram cerca de 3,7% do total das emissões de GEE consideradas no país, correspondentes a 2.599.050 tCO₂eq (Carmo, 2013).

No Brasil, o setor de resíduos, responsável pelas emissões de GEE oriundas da disposição de resíduos sólidos e do tratamento de esgoto, é responsável por 4% das emissões. Com a universalização dos serviços de saneamento prevista no Plano Nacional de Saneamento Básico, há uma perspectiva de aumento das emissões de GEE nesse setor (Filippini *et al.*, 2017).

Para mitigar os efeitos dessa atividade, no trabalho realizado por (Bilotta & Ross, 2016), concluiu-se que a recuperação do biogás gerado na Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) estudada resultaria em benefícios econômicos e ambientais, pois a produção de metano foi de 1.427,2 m³/dia, gerando energia elétrica disponível em torno de 65.280,3 kWh/mês (59% da demanda média mensal de energia da estação), com uma emissão real evitada de 946,3 kgCH₄/dia e 17.192,6 kgCO₂eq/dia.

Outra medida de mitigação para os sistemas de tratamento de efluentes é a instalação de telhados verdes, uma vez que estes podem atuar como sequestradores de poluentes (Tassi *et al.*, 2014), inclusive CO₂ (Uhmann; Tavares, 2017). Em Portugal, existe a cobertura da ETAR de Alcântara como exemplo, com uma cobertura verde de quase 3 ha, a maior da península ibérica (Leandro, 2011).

No que concerne a mitigação, o reaproveitamento energético é o ponto chave, devido às emissões de GEE associadas à produção de energia. Assim, a melhoria da eficiência energética das ETAR's, bem como o reaproveitamento do biogás são ações necessárias para a sustentabilidade desse setor. Além disso, são igualmente importantes as providências relativas à priorização de fontes de energias renováveis para suprimentos das necessidades energéticas das ETAR's, bem como dos setores associados (produção dos produtos químicos, por exemplo) (Godinho, 2015).

Para além das contribuições com emissão de GEE, analisando a influência das alterações climáticas nos sistemas de tratamento de efluentes, tem-se que podem ocorrer mudanças na qualidade e quantidade das águas residuais que entram nas estações de tratamento (devido ao excesso de chuva), com implicações nas operações e processos de tratamento pela exposição a fenômenos extremos (Carmo, 2013). As

interferências na eficiência do tratamento podem levar ao lançamento de efluentes fora do padrão estabelecido pela legislação vigente, comprometendo assim a qualidade ambiental do recurso hídrico receptor.

Diante disso, as medidas de adaptação se tornam necessárias e elas podem acontecer tanto a montante da estação de tratamento como entre órgãos no seu interior. Como exemplo de adaptação a montante tem-se o controle da afluência de caudais pluviais, especialmente nos locais onde o esgoto e as águas pluviais são transportados numa mesma conduta (sistema unitário), com sérias implicações negativas quando da ocorrência de eventos mais frequentes e intensos de precipitações, pois uma maior quantidade de efluente chegará à ETAR, a qual não fora projetada para esse excesso de volume. Nessas ocasiões, pode ocorrer o extravasamento direto do efluente bruto para o meio receptor, e o aumento de caudal e diluição das águas residuais na ETAR, afetando a eficiência do processo e o risco de perda de biomassa e microrganismos responsáveis pelo tratamento.

Já nos períodos de estiagem, os sistemas de drenagem de águas residuais recebem um caudal menor, e em muitos casos, a gestão destas infraestruturas, para caudais muito inferiores aos do projeto, não permite assegurar um desempenho adequado (Carmo, 2013).

Assim, as soluções de controle na origem de águas pluviais, técnicas adotadas com o intuito de reduzir os caudais de ponta e o volume de água recebido pelos coletores, por meio de processos de infiltração e retenção, parecem ser medidas adaptativas adequadas. Dentre essas técnicas se pode citar as bacias de retenção, valas cobertas por vegetação, trincheiras e telhados verdes (Carmo, 2013; Matos, 2006).

Além das técnicas de controle na origem, medidas mais efetivas de separação das águas também são desejáveis, com redes separativas de águas residuais e águas pluviais. Ou ainda estruturas de reserva a montante das ETAR para servir como componente de regulação hidráulica. Em eventos de fortes chuvas, os reservatórios podem armazenar parte da água e enviar, posteriormente, lentamente para as ETAR's (Carmo, 2013; Matos, 2006).

Sistemas de monitorização dinâmica que auxiliem processos de tomada de decisão em tempo real podem também constituir importantes medidas adaptativas no que diz respeito a uma gestão segura do tratamento de acordo com flutuações na quantidade e qualidade dos efluentes (Carmo, 2013).

Além de mudanças nas infraestruturas, o setor do saneamento também pode contribuir para a adaptação de outros setores como a agricultura, as florestas, a energia, a produção industrial, os ecossistemas, a biodiversidade e as zonas costeiras.

É nesse momento que surge a reutilização de água como um bom exemplo de como o setor de esgotamento sanitário pode contribuir para a adaptação do setor agrícola, diminuindo a demanda por água “bruta” nos processos de irrigação e aumentando a oferta de água para consumo humano, principalmente nas regiões onde há previsão de aumento dos eventos de seca, como no nordeste do Brasil, conforme relata (Jiménez Cisneros *et al.*, 2014). Além desse benefício, a reutilização de águas residuais tratadas evita ou diminui o lançamento de efluentes em corpos d’água, reduzindo a poluição hídrica.

A reutilização de águas residuais pode também ser usada no combate a incêndios. Na indústria, pode ser utilizada em processos que não requeiram água com elevado grau de pureza. Nas cidades, pode ser usada para paisagismo e atenuação dos efeitos das ilhas de calor, com a construção de lagos artificiais, limpeza urbana e rega de espaços verdes.

2.2.4 Adaptação do setor da água no nordeste do Brasil

A região Nordeste do Brasil é um território bastante castigado pela escassez de recursos hídricos, conhecida como o “Polígono das Secas”, e os estudos sobre a influência das alterações climáticas nos recursos hídricos têm apresentado resultados preocupantes. Em particular, a diminuição anual das chuvas esteve acompanhada do aumento dos períodos máximos de estiagem que passaram de 20 para 35 dias, e do aumento da frequência de eventos de precipitação intensa (superior a 50 mm em 24 horas), que passaram de cinco para nove ocorrências por ano (Nobre, 2011).

O Ceará, localizado no nordeste do Brasil, sofre com constantes secas. A crise hídrica em que se encontra esse Estado desde 2011 já afetava, em 2020, 104 municípios. Somados aos 46 municípios que já se encontravam em situação crítica reconhecida pelo Governo Federal, o Ceará encontrava-se, em 2020, com 81% de suas cidades em situação de emergência (Andrade *et al.*, 2020).

A histórica variabilidade climática intrínseca ao clima semiárido do Nordeste do Brasil foi, por muito tempo, tomada como fator de desvantagem regional, o que levou aos governos a realizarem planejamentos para tentar mudar essa situação. Como

exemplo se pode citar a construção do “Canal do Trabalhador”, no Estado do Ceará, com 98 km de extensão, interligando o rio Jaguaribe e o açude Orós ao açude Pacajus, que abastece Fortaleza, a capital do estado, com base na previsão de que a região enfrentaria uma grande seca em 1993, o que de fato se confirmou e essa obra evitou que a cidade entrasse em colapso de fornecimento de água (Nobre, 2011). Mais recentemente se pode citar a transposição do rio São Francisco e o projeto de dessalinização de água do Mar em Fortaleza. (Secretaria de Recursos Hídricos, 2020).

No tocante a dessalinização, o Estado do Ceará, por meio da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), está desenvolvendo um projeto de uma usina de dessalinização de água do mar, em Fortaleza, para aumentar a oferta hídrica na capital do estado, que tem sofrido com as ameaças de racionamento, tendo em vista o longo período de estiagem pelo qual o estado tem passado (Nunes; Diógenes, 2020).

Para proteção dos recursos hídricos, o Estado do Ceará, por exemplo, possui a Política Estadual dos Recursos Hídricos (Lei Nº 11.996/1992). É nessa Lei que está prevista a cobrança pelo uso da água, através da Outorga, ou seja, a implantação de qualquer empreendimento, que consuma Recursos Hídricos, superficiais ou subterrâneos, a realização de obras ou serviços que alterem o regime, quantidade ou qualidade dos mesmos, depende de autorização do Estado. É nessa mesma lei que surge os comitês de bacias hidrográficas, um colegiado que permite a participação da sociedade civil, com direito a voto, nas decisões concernentes ao gerenciamento dos recursos hídricos da bacia respectiva.

Em termos de qualidade, foi promulgada no Estado do Ceará a Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA) Nº 02/2017, que dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, ou seja, todo e qualquer empreendimento que gere e lance água residual no ambiente, só o poderá fazer após tratá-la, deixando-a dentro dos padrões recomendados pela resolução acima mencionada (Resolução No 02/2017, de 2 de Fevereiro Do Conselho Estadual Do Meio Ambiente, 2017).

Resumidamente, a construção de grandes barragens, a articulação dos comitês de bacias hidrográficas, o programa de construção de cisternas para captação de água pluvial, o forte arcabouço legal envolvendo a matéria ambiental e, mais recentemente, a transposição de bacias e a dessalinização são exemplos de como a região Nordeste do Brasil tem se adaptado para melhorar sua resiliência frente as

características naturais adversas e a intensificação de tal realidade face às mudanças climáticas,

É nesse cenário que as ações de planejamento despontam na tentativa de superar as dificuldades atuais e futuras da região. Além da legislação ambiental que estabelece os limites do que pode ou não ser realizado nos territórios e as obras de infraestrutura já realizadas para o enfrentamento da seca, podem citar-se outros projetos com o mesmo objetivo.

Uma ação de planejamento que tem recebido atenção recentemente são os projetos de reutilização de água para a agricultura e outros usos compatíveis. A reutilização de água nas grandes cidades e regiões metropolitanas pode diminuir a necessidade de captação de água nos açudes que abastecem essas regiões, aumentando a disponibilidade de água para os sítios do interior do Estado, além de contribuir para um melhor paisagismo e diminuição das ilhas de calor.

Em 2016, o Estado do Ceará publicou a Lei Nº 16.033, que versa sobre a política de reutilização de água não potável no âmbito do Estado e estabelece critérios com o objetivo de viabilizar e estimular a sua prática, com a ressalva de que o reuso só pode ser feito para fins não potáveis. Além dessa lei, o Ceará também promulgou outros dispositivos legais relacionados com a reutilização de água, tais como: Lei Nº 16.034/2016, que permite a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), para operações internas e de importação de máquinas, aparelhos e equipamentos relacionados com projetos de reutilização; Lei Complementar Nº 162/2016, que traz a reutilização de água para a Política Estadual de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário; e a Resolução COEMA Nº 02/2017, que além do padrão de qualidade para lançamento em corpos d'água também estabelece o padrão para o reuso no Ceará (Lei Nº 16.033, de 20 de Junho, 2016; Lei Nº 16.034, de 20 de Junho, 2016; Lei Nº 162, de 20 de Junho, 2016; Resolução Nº 02/2017, de 2 de Fevereiro Do Conselho Estadual Do Meio Ambiente, 2017).

Apesar dos incentivos, não se tem conhecimento de alguma cidade do Estado do Ceará que possua um projeto de reutilização de água em operação. Em consulta, por meio da plataforma Ceará Transparente, a Secretaria de Recursos Hídricos estadual (SRH), competente para reunir, atualizar e divulgar dados e indicadores sobre o reuso de água no Estado do Ceará, de acordo com a Lei Nº 16.033/2016, informou sobre alguns projetos em elaboração.

No Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará 2018-2027, estão elencados os seguintes projetos de reuso: (1) Reuso de Efluentes Sanitários para Fins Industriais e Agrícolas; (2) Reuso de Efluente Industrial no Distrito Industrial de Pacajus-Horizonte e (3) Plano de Reuso para Vales Perenizados (SRH, 2018).

Os investimentos em reutilização de águas já estão previstos na agenda 2030 do Brasil para atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, mas a realidade atual mostra que ainda são poucas as iniciativas decorrentes de políticas públicas para fomentar essa prática como parte de estratégia e instrumentos de saneamento ambiental e gestão sustentável de águas. A escassez hídrica em algumas regiões do país proporcionou algumas oportunidades para iniciativas isoladas para reutilização de águas pluviais, mas ainda há que se avançar na promoção da reutilização segura (IPEA, 2018).

2.2.5 Adaptação do setor da água em Portugal

Portugal já sofre com a escassez hídrica que afeta principalmente extensas áreas das regiões do Alentejo e do Algarve, mas também o nordeste transmontano e o leste da Beira. As previsões relativas às alterações climáticas traçam um cenário de agravamento no sul do país no que toca à disponibilidade de recursos hídricos (Monte; Albuquerque, 2010).

Segundo (Monte & Albuquerque, 2010), a agricultura é, de longe, o maior consumidor de água em Portugal, com 87,3% do consumo total. O turismo no país também tem registrado elevado desenvolvimento nas últimas décadas e a região do Algarve é um exemplo por se tratar de uma região em que o turismo e o golfe constituem a base estrutural da sua economia, mas que sofre de acentuada escassez de recursos hídricos, com uma precipitação média anual de aproximadamente 500 mm.

É nesse contexto de escassez hídrica e elevado consumo que se insere, para a região de Lisboa, o projeto Adaptaclima-EPAL, da Empresa Portuguesa das Águas Livres S.A. (EPAL), a maior e mais antiga empresa de abastecimento de água de Portugal. Esse projeto, inserido na vertente da adaptação, teve como objetivo a avaliação dos potenciais impactos das alterações climáticas sobre os sistemas de abastecimento de água operados pela EPAL, bem como a identificação de medidas de adaptação necessárias (Luís; Cruz, 2014).

Em termos de impactos, os relacionados com as alterações climáticas são hoje simulados em modelos globais de circulação atmosférica. No projeto Adaptaclima-EPAL o modelo de circulação global (GCM) usado foi o HadCM3 com uma regionalização (dowscaling) para uma escala de maior resolução para as variáveis precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima para os cenários A2 e B2 do IPCC (Luís; Cruz, 2014).

Quanto a precipitação, os resultados do modelo apontaram um decréscimo de 28% no cenário A2 e 16% no cenário B2, em relação ao período de referência de 1960-1999 (Luís; Cruz, 2014). Em relação aos extremos associados com a precipitação, as projeções apontam para um decréscimo no número de dias de forte precipitação, na precipitação total e na intensidade, acompanhando de um aumento significativo do número e da magnitude das secas ao longo do século XXI (Luís; Cruz, 2014).

As previsões relacionadas com a temperatura mínima e máxima apontaram para um aumento para o final do século XXI de cerca de 3°C para o cenário A2 e de 2°C para o cenário B2, com as temperaturas mínimas e máximas aumentando de forma contínua ao longo do século, deixando de haver valores médios abaixo dos valores de referência (1961-1990) a partir de meados do século para ambos os cenários. Quanto aos extremos, as simulações do projeto Adaptaclima mostraram um aumento na frequência e intensidade de ondas de calor e diminuição das ondas de frio até o final do século (Luís; Cruz, 2014).

A partir desses cenários, uma questão surge: quais os reflexos para a sociedade portuguesa? O projeto Adaptaclima também responde, apresentando os cenários socioeconómicos para a área de atendimento situada em grande parte na bacia hidrográfica do rio Tejo (onde se situam as captações da EPAL) e ainda os concelhos da região Oeste. Os resultados mostraram um aumento da população no cenário A2 e aumento das áreas urbanas e redução das áreas agrícolas nos dois cenários avaliados. Já em relação ao consumo de água, os cenários mostraram uma redução progressiva até o final do século. Tal situação pode ser explicada pelo aumento esperado na eficiência de utilização da água em todos os setores da economia e a redução da área agrícola. Estes resultados estão de acordo com os estudos globais conhecidos que apontam Portugal como um dos países que irá reduzir o consumo de água durante as próximas décadas, devido sobretudo ao aumento da eficiência das estruturas de rega (Luís; Cruz, 2014).

Uma ressalva, entretanto, é feita em relação a essas perspectivas de redução do consumo de água, pois considerando os cenários de aumento da estação quente e seca, a demanda pode aumentar nesses meses, levando a problemas de disponibilidade hídrica (Luís; Cruz, 2014).

Com base nesses resultados, a EPAL avaliou as vulnerabilidades dos seus sistemas. De modo geral, identificou-se um aumento da vulnerabilidade a secas, determinado por uma diminuição de caudais afluentes ou níveis piezométricos em todas as captações. Esta maior vulnerabilidade é ainda potenciada por um aumento da severidade dos períodos de seca. Na captação de Castelo do Bode, por exemplo, a manutenção dos níveis de consumo atuais tornar-se-á insustentável, aumentando a médio e longo prazo um conflito de interesses entre diferentes usos de água (Luís; Cruz, 2014).

Quanto a qualidade da água, embora se tenha previsto uma redução, a vulnerabilidade não foi considerada alta devido a atual capacidade de tratamento garantir a produção de água dentro dos padrões requeridos pela legislação vigente (Luís; Cruz, 2014).

Considerando as vulnerabilidades identificadas, tanto atuais quanto futuras, em termos de quantidade e qualidade, as ações adaptativas tomadas pela EPAL incluem:

- Colocar os equipamentos em patamares mais elevados e fora da zona inundável;
- Reabilitar e reformular os processos de tratamento nas estações onde se identificou a necessidade de proteção contra inundações;
- Alterar as relações institucionais com outros agentes, estabelecendo limites críticos para utilização da albufeira de Castelo de Bode, como forma de garantir volume de captação, controle de caudais e cargas poluentes descarregadas, e evitar conflitos de uso em períodos de seca;
- Alterar a oferta de água através da construção de um sistema de aproveitamento da descarga de fundo das estações de tratamento de água (para reutilização de água);
- Promover acordos de cooperação no planejamento e gestão partilhada de recursos (usos do solo, florestas, prevenção de fogos) que influenciam direta ou indiretamente nas captações;

- Promover acordos de cooperação de partilha do conhecimento e informação sobre processos de decisão em situação de eventos extremos;
- Apoiar e promover o desenvolvimento de legislação e/ou regulamentação que aumente o nível de proteção das captações.

No projeto Adaptaclima a reutilização de água residual aparece como uma das medidas de adaptação às alterações climáticas. É nessa perspectiva, portanto, que foi desenvolvido o Plano Estratégico de Reutilização de Água da Cidade de Lisboa.

Na capital de Portugal, a crescente preocupação com a salubridade, aliada à criação de espaços e corredores verdes para usufruto da população, encontra grandes benefícios no aproveitamento do efluente tratado nas estações de tratamento de águas residuais (ETAR) da empresa Águas de Tejo Atlântico.

Portugal dispõe de uma significativa taxa de cobertura com serviço de tratamento de águas residuais urbanas com nível de tratamento secundário e terciário. O efluente final das estações de tratamento de águas residuais urbanas constitui um apreciável volume de água, superior a 500 milhões de m³ anuais (Monte; Albuquerque, 2010).

Na área de Lisboa, segundo (Ferreira *et al.*, 2019) são produzidas diariamente nas suas ETAR's cerca de 250.000 m³ de águas residuais que, depois de sofrerem tratamento adequado, poderão ser uma importante fonte de água e de nutrientes para irrigação, para usos urbanos não potáveis e para usos industriais, contribuindo para a sustentabilidade do ciclo urbano da água na cidade.

O Plano Estratégico para Reutilização da Água da Cidade de Lisboa (PLERAL 2020) prevê a concretização de infraestruturas estruturantes (canalizações, reservatórios e sistemas elevatórios) com origem nas três ETAR's da cidade (Alcântara, Chelas e Beirolas), com investimentos de cerca de 16 milhões de euros ao longo de 3 fases de implementação (Ferreira *et al.*, 2019).

O horizonte do projeto de reutilização de água residual da cidade de Lisboa prevê, ao longo de cerca de 10 anos, a construção de cerca de 55 km de canalizações principais, 13 reservatórios e 19 instalações elevatórias, com o objetivo de dotar a cidade de um sistema de reutilização adequado às suas necessidades, garantindo uma fonte de água alternativa à do abastecimento para consumo público, com os correspondentes benefícios em termos de resiliência, de sustentabilidade e de adaptação as alterações

climáticas. No total, será disponibilizada anualmente mais de 1,1 hm³ de água para a rega de cerca de 191 ha de zonas verdes, e serão criados eixos de desenvolvimento de infraestruturas de transporte que permitem o fornecimento local de água reciclada para limpeza urbana (Ferreira *et al.*, 2019).

A região do Alentejo é outro sítio que tem investido em projetos de reutilização de água residual tratada como forma de suplementação das fontes hídricas. O projeto REUSE assume o tratamento local de referência por lagoas de estabilização com desinfecção solar (ETAR de Beja) para produção de água para reutilização em rega de pomares. Já o projeto AGUA VINI promove a reutilização de água residual tratada para a atividade vitivinícola, mais especificamente para a vinha produzida na Herdade da Ravasqueira, gerida pela Sociedade Agrícola D. Diniz S.A., com água produzida na ETAR de Arraiolos Poente, explorada pela empresa Águas Pública do Alentejo S.A..

A reutilização de água residual tratada já é, portanto, um assunto que vem sendo debatido em Portugal como uma maneira de suplementação das fontes hídricas tradicionais, tendo em vista a necessidade crescente, a escassez de recursos hídricos, as alterações climáticas, os objetivos do desenvolvimento sustentável da ONU (ODS 6 – água potável e saneamento) e a pressão crescente da opinião pública. As metas portuguesas são de 10% de taxas de reutilização em 2025 e de 20% em 2030. A sua implementação, entretanto, enfrenta dificuldades com a tradicional escassez de meios econômicos e financeiros das entidades gestoras, a volatilidade política e o baixo custo da água (potável) usada na agricultura, em contraponto com os investimentos necessários. Esse cenário evidencia a importância de um modelo de apoio à decisão pela reutilização de água, de forma a identificar, logo na fase inicial do projeto, a sua viabilidade.

2.3 PERSPECTIVAS DE REUTILIZAÇÃO

A reutilização de água tem ganhado destaque no sentido de economizar água potável e reduzir o impacto ambiental pelo descarte de água residual em recursos hídricos superficiais ou subterrâneos. Ou seja, contribui para aumentar a disponibilidade dos recursos hídricos necessários para satisfação das necessidades presentes e futuras para usos mais nobres e, ao reduzir o caudal de águas residuais tratadas descarregado nos meios receptores, protege os ecossistemas de poluentes lançados no meio (Alberich *et al.*, 2018; Monte; Albuquerque, 2010; Narr *et al.*, 2019).

A reutilização de águas para fins múltiplos é hoje encarada como um eixo central da gestão sustentável dos recursos hídricos. A existência de tecnologia que possibilita que as águas residuais sejam tratadas até praticamente qualquer nível de qualidade que se pretenda possibilita que a reutilização de água seja considerada cada vez mais uma importante solução ambiental como alternativa à sua rejeição nos meios receptores. De fato, uma das estratégias de gestão integrada dos recursos hídricos passa por dinamizar a utilização deste recurso para usos não potáveis, como a rega, a indústria ou os usos recreativos, que representam um grande consumo de água e cujos requisitos de qualidade são substancialmente inferiores aos da água para consumo humano (Monte; Albuquerque, 2010).

Neste tópico buscou-se apresentar um panorama mundial das atuais práticas de reutilização de água residual tratada, incluindo as várias possibilidades de aplicação.

2.3.1 A reutilização de água e suas possibilidades

Face às previsões de redução da disponibilidade hídrica, uma alternativa que tem se destacado ultimamente, mas cujo potencial ainda pode ser melhor explorado, é a reutilização de água residual tratada, uma fonte que não depende da incerteza climática e contribui para a transição para uma economia mais circular, trazendo benefícios nas vertentes econômica, ambiental e social, reservando o aproveitamento da água potável para usos exclusivamente de consumo humano, além do reaproveitamento de nutrientes presentes no efluente tratado, para uma maior produtividade agrícola.

A Figura 2.4 apresenta um panorama dos percentuais dessa prática no mundo. Como se constata, ser um país industrializado ou com renda elevada, não significa possuir altas taxas de reuso. A escassez hídrica, entretanto, pode ser um indicador, considerando os altos índices de reutilização nos países do Oriente Médio. No entanto, países desenvolvidos, mas com escassez hídrica, como Portugal e Brasil reutilizam apenas 1,2% e 1,5% de suas águas residuais tratadas, respectivamente (Água, 2023; Gondhalekar *et al.*, 2019).

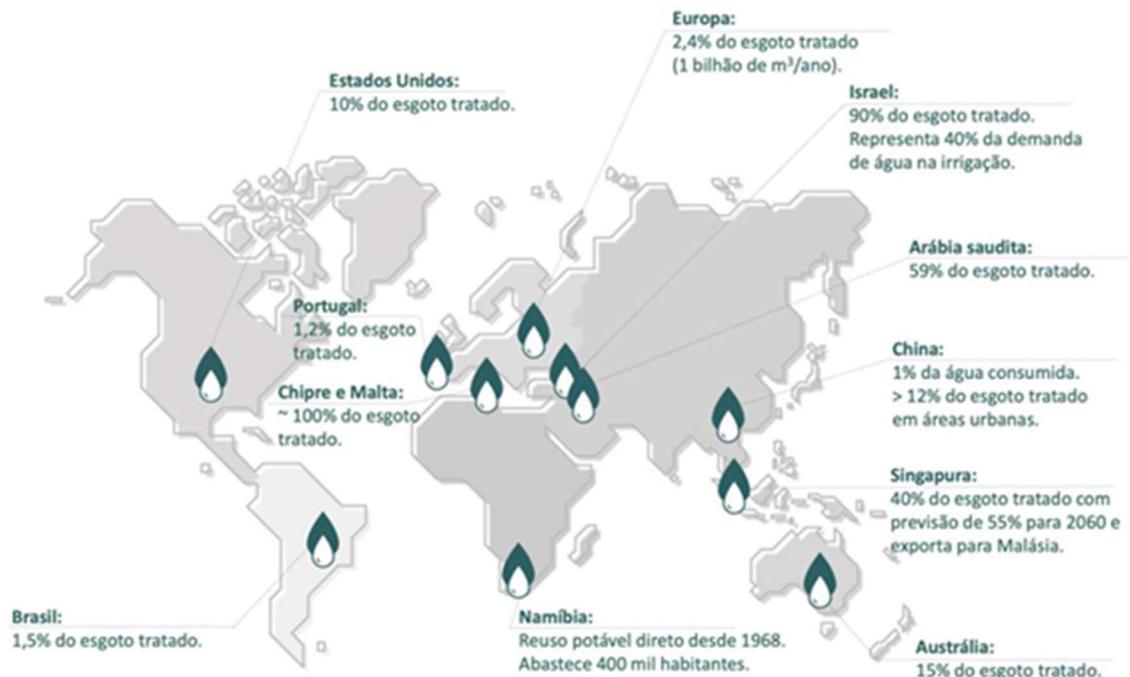


Figura 2.4 – Percentual de reutilização de água no mundo. Fonte: IRdA (2023)

Vários são os exemplos de sucesso da reutilização de água em todo o mundo (Duong; Saphores, 2015; Lazarova *et al.*, 2013), mas também há várias regiões onde os projetos não prosperaram. Já existe no mercado tecnologia disponível para tratar o efluente de acordo com a finalidade do uso, superando essa barreira inicial que tornaria inviável a reutilização. Seria de esperar, portanto, que essa prática já estivesse sendo melhor explorada, mas o que se observa é uma variação regional no percentual de uso dessa fonte alternativa de água, o que pode ser explicado, muitas vezes, pelas barreiras que atrapalham a exploração desse recurso que pode ser a salva-guarda de muitos países (Mohammad, 2018). Os números atualmente relacionados com a reutilização indicam que as variáveis determinantes para a reutilização de água são complexas e podem envolver fatores climáticos, institucionais e culturais, entre outros (Gondhalekar; Al-azzawi; Drewes, 2019).

A principal motivação para a reutilização de água residual tratada é sem dúvida a escassez hídrica, mas há regiões ricas em recursos hídricos que se utilizam dessa prática como forma de proteção ambiental pela redução parcial ou total da descarga de águas residuais nos meios receptores. O estado da Florida (EUA) é um exemplo deste tipo de motivação, pois muitos dos sistemas de reutilização de água implementados neste estado foram desenvolvidos com objetivos de proteção ambiental (Monte; Albuquerque, 2010).

No continente americano, o percentual de reuso ainda é pequeno, com o México possuindo a maior percentagem com 11,1% e o Brasil com 1,5% de reutilização do efluente tratado (Gondhalekar; Al-azzawi; Drewes, 2019). A Argentina também possui importantes projetos de reutilização na agricultura (Monte; Albuquerque, 2010). Na América Latina, mais de 500.000 há de terra agricultável é irrigada com esgoto bruto (Duong; Saphores, 2015).

De acordo com (Água, 2023), o continente europeu reutiliza somente 2,4% de água residual tratada, com destaque para Chipre e Malta cujos índices de reutilização são superiores a 50%. Praticamente 3/4 dessa fonte alternativa de água é utilizada na agricultura, sendo os outros usos distribuídos entre aplicação ambiental, recarga de aquífero, e usos industriais e urbanos. A porcentagem de cada um desses usos, entretanto, é variável com um maior uso na agricultura nas regiões mediterrâneas enquanto nos países atlânticos e continentais, a reutilização ocorre principalmente em aplicações urbanas, ambientais e industriais. Em Chipre, por exemplo, 60% da água residual tratada é usada para a irrigação de paisagens e campos de golfe. Já em Clermont-Ferrand, na França, 500.000 m³/dia de efluente tratado são usados para irrigação de 700 ha de milho (Duong; Saphores, 2015).

Nos continentes asiático e africano, há um uso significativo de água residual não tratada na agricultura. Na China, contudo, somente pouco mais de 12% do total de esgoto tratado é reutilizado. Já a Namíbia, com 2/3 da população sem acesso a esgotamento sanitário, possui uma ETAR que produz água potável a partir do efluente, que representou, em 2002, mais de 1/3 das necessidades de água da cidade (Duong; Saphores, 2015). A África do Sul e a Namíbia destacam-se no continente africano com 45,5% e 29,7% de reutilização de águas residual tratada, respectivamente, enquanto na Ásia o destaque vai para Singapura, com 40% de reuso de efluente tratado (Gondhalekar; Al-azzawi; Drewes, 2019).

No Médio Oriente, a reutilização de água residual tratada é majoritariamente feito na agricultura. Nesse território, Israel destaca-se com a reutilização de 90% da água residual tratada (Gondhalekar; Al-azzawi; Drewes, 2019), não somente devido a um sistema legislativo adequado criado a várias décadas, mas também devido as suas instituições e políticas que inspiram confiança nos usuários de água residual tratada. Além da escassez hídrica, o fornecimento de apoio técnico pelo governo e a

disponibilidade a um preço 20% menor do que a água bruta de abastecimento, são fatores que facilitam a aceitação pública do reuso em Israel.

Na Oceania, o destaque vai para a Austrália, com uma percentagem de coleta de esgoto de 87,3%, dos quais 95,5% são tratados e desses, 15% é reutilizado. Em termos mundiais, segundo (Gondhalekar *et al.*, 2019), 11,6% da água residual tratada é reutilizada para alguma finalidade. A Europa, por exemplo, possui um índice de coleta e tratamento de esgoto em torno de 93%, mas a reutilização em Chipre é acima de 50%, enquanto na França, na Espanha e em Portugal os percentuais rondam 10%, 16% e 1,2%, respectivamente.

Em termos de possibilidades de reutilização de água, a literatura destaca a agricultura, a indústria, a aquicultura e usos urbanos (região de áreas verdes, lavagem de ruas, lagos artificiais, combate a incêndio, etc), além de fins ambientais, quando a água é reutilizada para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente (conservação e recuperação de zonas úmidas que constituem habitat de vida selvagem, por exemplo), recarga de aquíferos e o uso direto como água potável, sendo muito mais comum os usos não potáveis. Para cada um desses usos, entretanto, a água precisa possuir uma qualidade específica, de forma a garantir a segurança ambiental e de saúde pública, e que se consegue através das várias tecnologias de tratamento já disponíveis no mercado (Bixio *et al.*, 2006; Duong; Saphores, 2015; Hidalgo *et al.*, 2007; Meneses; Pasqualino; Castells, 2010; Monte; Albuquerque, 2010).

2.3.1.1 Reutilização para fins urbanos

A reutilização urbana abrange a utilização de água residual tratada para finalidades tais como: lavagem de veículos, de pavimentos, coletores, espaços e equipamentos de construção, humedecimento do solo em obras, controle de poeiras, produção de materiais de construção (betão, por exemplo), rega de espaços verdes de acesso livre ou condicionados, fontes e espelhos d'água, sistemas de ar-condicionado, combate a incêndios, fusão de neve, descarga de sanitários, alimentação de lagos e lagoas para prática de desportos náuticos e produção de neve artificial.

Conforme já mencionado anteriormente, cada finalidade de reutilização exige uma qualidade específica da água. A utilização em sanitários é um dos usos urbanos mais exigentes, devido à frequência de uso e ao rotavírus, organismo de referência para Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM). As

características microbiológicas, para os usos urbanos, são geralmente consideradas primordiais, devido a grande probabilidade de contato humano com os ambientes irrigados e/ou com os equipamentos que utilizam a água reutilizada.

Do ponto de vista agronômico, os requisitos de qualidade das águas residuais para utilização em rega paisagística são análogos aos da rega agrícola. A salinidade é uma das características mais relevantes, sendo importante que as plantas selecionadas para um projeto paisagístico, cuja água de rega provenha de uma ETAR, sejam pelo menos medianamente tolerantes à salinidade (Monte; Albuquerque, 2010).

De modo geral, conforme relata (Monte & Albuquerque, 2010), as águas residuais utilizadas em rega paisagística são tratadas ao nível de tratamento terciário, menos frequentemente a tratamento secundário, e quase sempre submetidas a um processo de desinfecção. Consequentemente, neste tipo de reutilização e com águas residuais tratadas a este nível, são muito reduzidos os riscos de saúde pública por ingestão accidental da água de rega ou por contacto com plantas e superfícies regadas.

Em termos de volume de água, a rega paisagística constitui a segunda maior aplicação de reutilização de águas residuais tratadas em países desenvolvidos. Os EUA são o grande exemplo de reutilização para rega paisagística, a qual tende a aumentar significativamente em outras regiões, como a Europa e o Extremo Oriente. Em Portugal há um interesse crescente pela reutilização de águas residuais tratadas na rega de campos de golfe, principalmente nas regiões do Algarve e do Oeste, onde o consumo médio anual de água em um campo com 18 buracos é de 0,3 hm³, podendo o consumo duplicar (relativamente ao valor médio) no mês de maior necessidade (Monte; Albuquerque, 2010).

2.3.1.2 Reutilização para fins industriais

A reutilização de água para fins industriais consiste na utilização em processos, atividades e operações industriais. Na indústria, a água é frequentemente reutilizada para a mesma utilização, com recirculação, sem necessidade de ser submetida a qualquer tipo de tratamento, ou seja, apenas se repõem perdas por evaporação. Águas de arrefecimento constituem um caso típico de reciclagem de água.

O padrão de qualidade para a reutilização de água residual tratada para fins industriais depende da aplicação específica, sendo inviável generalizá-lo. Para (Monte & Albuquerque, 2010), por exemplo, algumas aplicações requerem água de elevada

qualidade, como a produção de vapor, outras são compatíveis com águas menos tratadas, como a construção civil. Nas águas de arrefecimento são importantes as características que podem dar origem a fenômenos de corrosão ou de incrustação (nomeadamente o teor de sólidos dissolvidos totais, os cloretos e o oxigénio dissolvido), ou à formação de filmes biológicos nas tubulações (como a matéria orgânica).

Os custos do tratamento da água residual e da captação e tratamento da água bruta, juntamente com a escassez hídrica são as principais variáveis que podem levar as indústrias a optarem pela reutilização de água residual. Em termos quantitativos, a reutilização para fins industriais representa a terceira principal aplicação de reutilização de águas, conforme (Monte & Albuquerque, 2010).

2.3.1.3 Reutilização para fins agrícolas

A reutilização de água para fins industriais consiste na utilização em processos, atividades e operações industriais. Na indústria, a água é frequentemente reutilizada para a mesma utilização, com recirculação, sem necessidade de ser submetida a qualquer tipo de tratamento, ou seja, apenas se repõem perdas por evaporação. Águas de arrefecimento constituem um caso típico de reciclagem de água.

O padrão de qualidade para a reutilização de água residual tratada para fins industriais depende da aplicação específica, sendo inviável generalizá-lo. Para (Monte & Albuquerque, 2010), por exemplo, algumas aplicações requerem água de elevada qualidade, como a produção de vapor, outras são compatíveis com águas menos tratadas, como a construção civil. Nas águas de arrefecimento são importantes as características que podem dar origem a fenômenos de corrosão ou de incrustação (nomeadamente o teor de sólidos dissolvidos totais, os cloretos e o oxigénio dissolvido), ou à formação de filmes biológicos nas tubulações (como a matéria orgânica).

Os custos do tratamento da água residual e da captação e tratamento da água bruta, juntamente com a escassez hídrica são as principais variáveis que podem levar as indústrias a optarem pela reutilização de água residual. Em termos quantitativos, a reutilização para fins industriais representa a terceira principal aplicação de reutilização de águas, conforme (Monte & Albuquerque, 2010).

2.3.1.4 Reutilização para fins de aquicultura

A qualidade do efluente tratado é o fator primordial na garantia da sustentabilidade da prática de reutilização em aquicultura. É necessário realizar o controle das cargas orgânicas sobre os níveis de oxigênio dissolvido, bem como a toxicidade da salinidade, teor de amônia, metais pesados, dentre outros contaminantes presentes nos efluentes. A remoção de nutrientes é o fator quase obrigatório na reutilização em aquicultura, principalmente no que se refere à amônia, que é tóxica para a maioria das espécies da fauna aquática em concentrações relativamente reduzidas (Caixeta, 2010).

A preocupação do ponto de vista de saúde pública são os trematódeos ou os ovos de: *Schistosoma*, *Fasciolopsis* e *Clonorchis*. O cuidado de contaminação no manejo dos tanques aquícolas deve ser redobrado para os trabalhadores da aquicultura. Certas espécies de peixes são hóspedes intermediários secundários de vários parasitas helmínticos (Caixeta, 2010).

Um dos aspectos mais importantes a serem observados é a qualidade sanitária dos peixes produzidos, pois estes concentram em suas vísceras bactérias, vírus e protozoários presentes na água. Dificilmente os patógenos (com exceção dos trematóides) penetram na carne comestível (músculo) dos peixes. Entretanto, se os peixes estiverem estressados, por exemplo, devido à superpopulação, qualidade pobre da água ou outras condições, então as bactérias e vírus podem ter capacidade de penetrar na carne comestível (Caixeta, 2010).

2.3.2 Desafios para reutilização de água

Um dos principais obstáculos para a reutilização de água é a rejeição pública, nomeadamente por conta do receio de efeitos negativos para a saúde humana, causada principalmente pela desinformação (Duong; Saphores, 2015). O que muitas pessoas não sabem é que já reutilizam água residual, tratada ou não, de forma indireta, pois os esgotos são lançados no solo, no mar ou em recursos hídricos superficiais que servem de fonte de abastecimento de água potável.

É claro que essa realidade não justifica a reutilização de forma irresponsável e para minimizar os riscos microbiológicos envolvidos, já existem tecnologias de tratamento de efluente disponíveis, além da adoção de barreiras físicas, como a restrição

de acesso às áreas onde água de baixa qualidade é usada, e o processamento de produtos irrigados com água residual (Duong; Saphores, 2015).

(Ricart, 2019) pontua ainda que é importante uma melhor comunicação da comunidade científica com a população e com os interessados e a participação desses nos projetos de reutilização. A educação pública, que informe sobre a escassez hídrica e a segurança da água residual tratada, e o marketing feito por agências de gestão da água, com apoio de especialistas reconhecidos, não associando a água recuperada ao esgoto, também é uma estratégia para vencer essa barreira, segundo (Duong; Saphores, 2015).

Outro obstáculo para a reutilização de água são os custos envolvidos, nomeadamente no que diz respeito às infraestruturas necessárias e, por conseguinte, estabelecer um preço competitivo com a fonte natural, tornando-a atrativa para os potenciais usuários. Vários estudos avaliam a disponibilidade para pagar pela água residual tratada, mostrando que essa variável depende da intenção do uso, das alternativas disponíveis e da existência de crise. Água residual recuperada pode então ser usada com base numa avaliação comparativa baseada na vontade de pagar dos usuários. Podem ser considerados, a curto prazo, incentivos para seduzir potenciais usuários a superarem suas apreensões (Duong; Saphores, 2015).

No que tange à legislação, nomeadamente ao estabelecimento dos padrões de qualidade para reutilização de água para um determinado fim, a sua ausência dificulta a aprovação dos projetos por parte do órgão ambiental licenciador, que precisa confirmar se o tratamento pelo qual o efluente passará produzirá uma água dentro dos padrões recomendados pela legislação vigente, para a finalidade proposta.

Especificamente sobre o aparato legal envolvendo a matéria da reutilização, (Hidalgo *et al.*, 2007) observaram que a estrutura legal e institucional ainda é fraca ou inexistente em alguns países. Alguns fazem referência a padrões internacionais, os quais são muito gerais ou que resultam em soluções de elevado custo.

Recentemente a União Europeia publicou o Regulamento (UE) 2020/74, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de maio de 2020, de aplicação obrigatória dos Estados Membros a partir de 2023. Enquanto isso, alguns países europeus possuem legislação própria, como a Espanha que através do Real Decreto 1620/2007, regula os níveis de qualidade, os usos possíveis e o monitoramento da água reciclada (Alberich *et al.*, 2018). Em Portugal, há o Decreto Lei N° 119/2019, de 21 de agosto, que estabelece

o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como o âmbito da sua utilização.

Independente do país, o que a legislação precisa de definir são limites máximos de concentração de cada parâmetro presente na água recuperada, de forma a não causar problemas de saúde e impacto ambiental negativo quando da sua reutilização para os mais variados fins. Dentre esses parâmetros, de acordo com vários autores (Gondhalekar; Al-azzawi; Drewes, 2019; Hidalgo *et al.*, 2007; Meneses; Pasqualino; Castells, 2010) pode-se citar como os mais relevantes a Carência Bioquímica de Oxigênio ou Demanda Bioquímica de Oxigênio (CBO₅ ou DBO₅), a Carência Química de Oxigênio ou Demanda Química de Oxigênio (CQO ou DQO), os Sólidos Suspensos Totais (SST), os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), a turbidez, a concentração de nutrientes (nitrogênio e fósforo), os organismos patogênicos (coliformes fecais, especialmente), o residual de cloro, o oxigênio dissolvido, os ovos de geohelmintos, a condutividade elétrica, a razão de adsorção de sódio e o potencial hidrogeniônico (pH). Além desses, em algumas situações pode ser necessário verificar a presença de vírus e metais pesados (Alberich *et al.*, 2018).

No Regulamento (UE) 2020/74, do Parlamento Europeu e do Conselho, apenas é considerada a irrigação agrícola, com a proposta de quatro classes de água residual, de acordo com a cultura a ser irrigada, sendo a classe A mais restritiva, podendo ser utilizada para todas as culturas, incluindo os alimentos consumidos crus ou cuja parte comestível entre em contato direto com a água residual tratada, e a classe D a menos restritiva, usada para o cultivo de culturas para fins industriais e de produção de energia. O tipo de tratamento e a periodicidade do monitoramento também varia entre as classes, sendo a classe A a que necessita de um maior nível de tratamento e um monitoramento mais rigoroso.

Com esse regulamento, que só estabelece padrão para a reutilização na agricultura, fica em falta os contaminantes emergentes, nomeadamente microplásticos e produtos cosméticos e farmacêuticos, atualmente em discussão. Sobre esses contaminantes, no entanto, a norma ISO 16075-1:2020 informa que até hoje não há evidências de efeitos adversos na saúde humana ou no meio ambiente via irrigação com água residual tratada ou via o consumo de culturas irrigadas com essa água (International Organization for Standardization, 2020).

Na análise das legislações existentes, observou-se diferenças entre as normas no que se refere aos parâmetros escolhidos e os seus respectivos limites máximos. Isso porque, ao depender da finalidade da reutilização, o padrão deve ser mais ou menos restritivo, para além das características locais exercerem influência na definição desses limites.

Dada as particularidades de cada local, é difícil o estabelecimento de um padrão universal. Até mesmo as diretrizes da OMS devem ser adaptadas aos fatores sociais, econômicos e ambientais locais (Carr, 2005). É preciso, portanto, que cada região, com base nas suas características, estabeleça os seus padrões, ação essa reconhecida não só como um dos incentivos ao aumento do número dos projetos de reutilização como também influenciadora da opinião pública em termos de confiança e aceitação da política de reutilização de água (Alberich *et al.*, 2018).

Resumidamente, conforme alguns autores (Alberich *et al.*, 2018; Bixio *et al.*, 2006; Malisa; Schwella; Kidd, 2019), para o fortalecimento da reutilização de água é necessário um gerenciamento integrado do setor de recursos hídricos, um fortalecimento da cooperação entre os interessados, o estabelecimento de instrumentos econômicos financiadores dos projetos, a construção de confiança e credibilidade e, principalmente, o estabelecimento de critérios claros sobre quando reutilizar e quais os padrões de qualidade que devem ser seguidos. A falta de governança, e de estratégias e políticas relacionadas com a reutilização de água residual tratada é um entrave para escalar esse tipo de projeto (Ricart, 2019).

A reutilização de água deve ser vista como uma reserva estratégica, especialmente em regiões que já sofrem com stress hídrico. Mesmo em situações em que a distância entre a Estação de Tratamento de Água Residual (ETAR) e o local da reutilização aponte para não viabilidade econômica, numa situação de crise em que não há água disponível, será que essa não viabilidade permanece?

3. LEGISLAÇÃO SOBRE REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme relatado anteriormente, a existência de um normativo legal que defina a qualidade da água para ser reutilizada para uma determinada finalidade é fundamental para a prática de uma reutilização segura. Neste capítulo 3 apresenta-se um panorama da legislação relacionada com a reutilização de água, com ênfase em Portugal e Brasil, destacando também o processo de avaliação e gestão do risco.

3.2 LEGISLAÇÃO EM NÍVEL MUNDIAL

Em termos de qualidade, não existe um padrão mundial que estabeleça a qualidade da água residual para cada finalidade de reutilização, até porque tal depende muito das características de cada local. Há países que possuem legislação própria e há outros que utilizam, por exemplo, as recomendações da Organização Mundial de Saúde.

Em nível mundial, a Organização Internacional de Normalização (ISO) editou algumas normas relacionadas com reutilização de água residual, tais como: ISO 16075-1: 2020 (Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects – Part 1: the basis of a reuse Project for irrigation); ISO 16075-2: 2020 (Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects – Part 2: Development of the Project for irrigation); ISO 20426:2018 (Guidelines for health risk assessment and management for non-potable water); ISO 20670:2018 (Water reuse – vocabulary).

3.3 LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL

Em 2020 a União Europeia publicou o Regulamento (UE) 2020/741, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de maio de 2020, de aplicação obrigatória nos Estados Membros a partir de 2023, estabelecendo as condições para a reutilização de água residual tratada para rega agrícola. Esse regulamento estabelece requisitos mínimos a aplicar às águas para reutilização para irrigação agrícola, obriga a existência da licença de produção e possui uma abordagem fit-for-purpose suportada numa avaliação de risco e de implementação de multibarreiras.

Em consonância com esse regulamento, Portugal publicou o (Decreto-Lei n.o 119/2019, 2019), que estabelece a qualidade da água residual tratada para utilização na rega, usos urbanos e usos industriais. Esse regulamento tem por base as normas ISO

16075-1:2020, ISO 16075-2:2020, ISO 20426:2018 e ISO 20670:2018, e possui uma abordagem fit-for-purpose suportada numa avaliação de risco e gestão do risco através de multibarreiras (barreira equivalente). O sistema aplica-se a sistemas centralizados (urbanos), descentralizados (não urbanos) e descentralizados em simbiose (escorrências agrícolas – água de várias origens para múltiplos fins) e está em linha com o Regulamento nº 2020/741, da União Europeia.

Portugal possui ainda a Portaria Nº 266/2019, de 26 de agosto, que estabelece a sinalização obrigatória nos locais de produção e utilização de água para reutilização e se encontra suportada pela norma ISO 20469:2018 – Guidelines for water quality grade classification for water reuse.

Portugal possui também o Decreto-lei nº 16/2021, de 24 de fevereiro, que integra a atividade de produção de água para reutilização ao serviço público de tratamento de efluentes e constitui, a par da coleta e disposição de efluentes, uma nova atividade para os sistemas multimunicipais de saneamento das águas residuais. Além disso, autoriza a inclusão da produção de água para reutilização na tarifa.

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) disponibiliza em seu sítio eletrônico um documento para apoio à avaliação do risco e para auxiliar a aplicação do Decreto-lei nº 119/2019 de forma a facilitar a implementação dos projetos de reutilização de água.

As Tabelas 3.1 a 3.5 apresentam um resumo dos critérios de qualidade de águas residuais tratadas para as mais diversas finalidades em Portugal.

Tabela 3.1 - Padrão da água residual tratada para reutilização em rega em Portugal.

Fonte: Decreto-Lei Nº 119/2019, de 21 de agosto

Classe de Qualidade ¹	² DBO ₅ (mg/L O ₂)	SST ³ (mg/L)	Turbidez (NTU)	E. coli (ufc/100 mL)	OG ⁴ (Nº/L)	⁵ NH ₄ (mg/L NH ₄ ⁺ /L)	⁶ N ₂ (mg N/L)	P ⁷ (mg P/L)
A	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 10				
B	≤ 25	≤ 35		≤ 100				
C	≤ 25	≤ 35		≤ 1000	≤ 1	10	15	5
D	≤ 25	≤ 35		≤ 10000	≤ 1			
E ⁸	≤ 40	≤ 60		≤ 10000				

Legenda: 1: Descrição na Tabela 3.3; 2: Demanda Bioquímica de Oxigênio ou Carência Bioquímica de Oxigênio (CBO₅); 3: Sólidos Suspensos Totais; 4: Ovo de Geohelminto, aplicável na rega de culturas agrícolas destinadas a consumo animal; 5: Nitrogênio Ammoniacal; 6: Nitrogênio total; 7: Fósforo total; 8: Só aplicados em sistemas descentralizados ou descentralizados em simbiose

Tabela 3.2 - Padrão da água residual tratada para reutilização em rega para proteção das culturas agrícolas, florestais e solo, em Portugal. Fonte: Decreto-Lei Nº 119/2019, de 21 de agosto

Parâmetro	Concentração Máxima	Unidade
Alumínio	5,0	mg Al/L
Berílio	0,1	mg Be/L
Cobalto	0,05	mg Co/L
Fluoretos	2,0	mg F-/L
Ferro	2,0	mg Fe/L
Lítio	2,5	mg Li/L
Manganês	0,2	mg Mn/L
Molibdênio	0,01	mg Mo/L
Selênio	0,02	mg Se/L
Vanádio	0,1	mg V/L
SAR (RAS)		Variável em função da sensibilidade da cultura
Salinidade		
Boro		

Tabela 3.3 – Classes de rega para reutilização de água residual tratada em Portugal.

Fonte: Decreto-Lei Nº 119/2019, de 21 de agosto

Classe	Possíveis Usos	Nível de Tratamento
A	Rega sem restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas cruas em que a parte comestível está em contato direto com a água; rega de jardins públicos sem restrição de acesso; rega de jardins privados. Rega com restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas cruas, que crescem acima do solo, e em que a parte comestível não está em contato direto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos; rega de jardins com restrição de acesso, incluindo áreas de lazer e desportivas (ex: campos de golfe).	Mais avançado que secundário (desinfecção)
B	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): rega de culturas consumidas cruas, que crescem acima do solo, e em que a parte comestível não está em contato direto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos.	Mais avançado que secundário (desinfecção)
C	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes, incluindo sementes para uso industrial ou produção de energia.	Mais avançado que secundário (desinfecção)
D	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes; rega de áreas de uso naturalmente restrito (ex: sebes, áreas de contenção)	Mais avançado que secundário (desinfecção)

Tabela 3.4 - Padrão da água residual tratada para reutilização em fins urbanos, em Portugal. Fonte: Decreto-Lei Nº 119/2019, de 21 de agosto

Parâmetro	Suporte de ecossistemas	Usos recreativos, de enquadramento paisagístico	Lavagem de ruas ⁶	Combate a incêndios ⁷	Arrefecimento	Descarga de sanitário ⁷	Lavagem de veículos(6)(8)
pH	A determinar	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,5 a 8,59	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
¹ BDO ₅	caso a caso	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25	
² Turbidez	em função do estado	≤ 5		≤ 5		≤ 5	≤ 5
³ Amônia	ecológico e respectivo	≤ 5			≤ 5	≤ 1 (na presença de cobre)	≤ 10
⁴ P	parâmetros de suporte	≤ 210			≤ 10	≤ 200	≤ 10
⁵ E.coli		≤ 10					≤ 10

Legenda: 1: Demanda Bioquímica de Oxigênio ou Carência Bioquímica de Oxigênio (CBO₅), em mg/L O₂; 2: Turbidez ou turvação, em NTU; 3: Nitrogênio Ammoniacal, em mg NH₄/L; 4: Fósforo Total, em mg/L; 5: E. coli, em ufc/100 mL; 6: Em sistemas de lavagem manual a alta pressão, as vias de exposição por ingestão (não intencionada) deverão ser consideradas de máxima importância nestes usos, pelo que a qualidade deverá ser similar à da classe A para rega; 7: As vias de exposição por ingestão (não intencionada) deverão ser consideradas de máxima importância nestes usos, pelo que a qualidade deverá ser similar à da classe A para rega; 8: Em função das especificidades das águas para reutilização, poderão ser controlados alguns metais e compostos iônicos, tais como ferro, manganês, cloretos, sulfatos, alcalinidade e sílica, para minimização de ocorrência de calcificação ou corrosão dos sistemas de armazenamento e distribuição de água; 9: Pode ocorrer crescimento microbiano a valores superiores ou inferiores a esta gama de pH; 10: Quando utilizado em locais sujeitos à ocorrência de eutrofização.

Tabela 3.5- Padrão da água residual tratada para reutilização na indústria, em Portugal (proteção para contato humano). Decreto-Lei Nº 119/2019, de 21 de agosto

Classe de Qualidade	Turbidez (NTU)	E. coli (ufc/100 mL)
Em circuitos com risco direto de ingestão (incluindo ingestão accidental, como por exemplo gotículas) e contato dérmico	≤ 5	≤ 10
Em circuitos com risco direto de contato dérmico		≤ 1000

3.4 LEGISLAÇÃO NO BRASIL

Quanto ao padrão de qualidade para água residual tratada ser reutilizada para alguma finalidade, o Brasil não possui uma legislação de âmbito nacional e de aplicação obrigatória. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) editou algumas normas relacionadas com o assunto, tais como: NBR 13969:1997, que estabelece padrão de qualidade para algumas finalidades de reuso; NBR 16782:2019 – conservação de água em edificações – requisitos, procedimentos e diretrizes; NBR 16783:2019 – uso de fontes alternativas de água não potável em edificações; NBR 15527:2019 – água de chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins potáveis.

Especificamente sobre a reutilização de água residual tratada no Brasil, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) publicou a Resolução Nº 54, de 28 de novembro de 2005, estabelecendo as modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água no território nacional, sem, contudo, estabelecer padrões de qualidade (“Resolução Nº 54/2005, de 28 de novembro do Conselho Nacional de Recursos Hídricos”, 2005).

O Brasil é o 6º país mais populoso do mundo, mas reusa de forma planejada apenas 1,5%, aproximadamente, do seu esgoto, apesar da Lei Nº 14.026/2020, novo marco legal do saneamento, destacar a importância do reuso de água, ao mencioná-la 8 vezes, no planejamento do saneamento eficiente, estruturado e sustentável. Ocorre que ainda não foi feito esse planejamento. Ainda não houve, no Brasil, alinhamento da reutilização de água com a gestão de recursos hídricos.

No Estado do Ceará, Brasil, foi promulgada a Lei Nº 16.033/2016, publicada no Diário Oficial do Estado em 22 de junho de 2016, que dispõe sobre a política de reuso de água não potável no âmbito do estado. Essa lei estabelece as modalidades de reutilização de água residual tratada no Ceará, vedando para fins de abastecimento humano. Exige também que as diretrizes para a reutilização de água, bem como as metas a serem cumpridas pelo Estado, estejam presentes no Plano Estadual de Recursos Hídricos e no Plano de Gerenciamento das águas de Bacias Hidrográficas (“Lei Nº 16.033, de 20 de junho”, 2016).

Essa mesma lei da reutilização de água residual tratada no Estado do Ceará também estabelece, entre outros aspectos, que: (1) a Secretaria dos Recursos Hídricos é competente para reunir, atualizar e divulgar, por meio do Sistema de Informação em Recursos Hídricos, dados e indicadores sobre o reuso de água no Estado do Ceará; (2) a atividade de reuso de água não potável está condicionada à outorga, devendo todos os equipamentos ou sistemas serem hidrometrados, conforme disposto em decreto; (3) fica instituído o Selo Reuso para os usuários de água de reuso externo e interno, cujos critérios referentes à obtenção e suspensão serão disciplinados por ato do Chefe do Poder Executivo; (4) a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, fica responsável por criar um programa de apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico das práticas de reuso de água; (5) a fiscalização da qualidade da água de reuso é de competência da Secretaria do Meio Ambiente e da Superintendência Estadual de Meio Ambiente (“Lei Nº 16.033, de 20 de junho”, 2016).

Especificamente sobre a qualidade da água residual tratada para as várias modalidades, o Estado do Ceará, em 2017, publicou a Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (COEMA) Nº 02, que dispõe sobre os padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras e estabelece também as condições para aprovação, pelo órgão ambiental licenciador, dos projetos de reutilização (“Resolução No 02/2017, de 2 de fevereiro do Conselho Estadual do Meio Ambiente”, 2017).

A Resolução COEMA Nº 02/2017 estabelece as modalidades de reutilização e as características da água residual tratada para cada modalidade, de acordo com a Tabela 3.6. Nessa tabela, explicita-se o termo efluente sanitário e utilização externa, conforme se descreve em seguida.

Cabe aqui informar a definição de efluente sanitário e não sanitário. Conforme a Resolução COEMA Nº 02/2017, efluente sanitário é uma denominação genérica para despejos líquidos residenciais, comerciais, águas de infiltração na rede coletora, os quais podem conter parcela de efluentes industriais e efluentes não domésticos. Já o efluente não sanitário é todo e qualquer efluente que não se enquadra na definição de efluente sanitário, incluindo os despejos líquidos provenientes das atividades industriais.

Quanto a definição de reutilização externa, a Resolução COEMA Nº 02/2017 conceitua como o uso de efluentes tratados provenientes das estações administradas por prestadores de serviços de saneamento básico ou terceiros. A reutilização interna, por sua vez, é definida como o uso interno da água de reuso proveniente de atividades realizadas no próprio empreendimento. Ou seja, para esse normativo, a reutilização para fins industriais é considerada um reuso interno, cuja qualidade da água é de responsabilidade do empreendedor e, por isso, não especificou um padrão de qualidade da água residual tratada a ser utilizada na indústria, deixando a cargo do empreendimento, de acordo com as suas especificidades, decidir a qualidade necessária de forma a não danificar seus equipamentos e atender as suas necessidades hídricas específicas.

Tabela 3.6 - Padrão da água residual tratada, de origem sanitária, para reutilização no Estado do Ceará. Fonte: Resolução COEMA Nº 02/2017, publicada no Diário Oficial do Estado do Ceará em 21/02/2017

Modalidade	<i>E. coli</i> ¹	OG ²	CE ³	pH	RAS ₄	Temperatura
Reutilização Urbana ⁷	Até 5.000 Até 1.000 ⁵	Até 1	Até 3.000	6,0 a 8,5	-	-
Reutilização Agrícola e Florestal ⁸	Culturas consumidas cruas Demais culturas	ND ⁶ Até 1.000	ND ⁶ Até 1	Até 3.000	6,0 a 8,5 6,0 a 8,5	15 15
Reutilização Ambiental ⁹	10.000	Até 1	Até 3.000	6,0 a 8,5	-	-
Reutilização na Aquicultura ¹⁰	1.000	ND ⁶	Até 3.000	6,0 a 8,0	-	Até 40 °C

Legenda: 1: Escherichia coli, em CT/100ml; 2: Ovo de Geohelminto, em ovo/l; 3: Condutividade Elétrica, em μ S/cm; 4: Razão de Adsorção de Sódio, em $(\text{mmolcL}^{-1})^{1/2}$; 5: Reutilização urbana para fins de irrigação paisagística; 6: Não Detectado; 7: Utilização de água de reuso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate de incêndio dentro da área urbana; 8: Utilização de água de reuso para a produção agrícola e cultivo de florestas plantadas; 9: Utilização de água de reuso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente; 10: Utilização de água de reuso para criação de animais ou para o cultivo de vegetais aquáticos.

A Tabela 3.6 apresenta as características da água residual tratada de origem sanitária para reutilização externa nas finalidades já estabelecidas, mas a Resolução COEMA Nº 02/2017 também estabelece padrão para a reutilização externa de água residual tratada de origem não sanitária. Para esse tipo de efluente (não sanitário), conforme o artigo 42 da resolução acima mencionada, além do padrão estabelecido na Tabela 3.6, também deverá ser obedecido os limites estabelecidos no artigo 11 e Anexo I, onde constam também as concentrações limites para alguns poluentes emergentes.

No que concerne à reutilização na indústria, o raciocínio do regulamento Cearense é coerente pois os requisitos de qualidade da água são específicos para cada atividade industrial. Porém, apesar da omissão da Resolução COEMA Nº 02/2017, alguns requisitos de qualidade são transversais a qualquer indústria, pois correspondem à prevenção de consequências indesejáveis, como a corrosão dos materiais, incrustações e o desenvolvimento de algas e/ou de biofilmes, provocadas pela presença de teores residuais de alguns constituintes das águas residuais, tais como: teor de sólidos dissolvidos totais (SDT), cloretos, oxigênio dissolvido (OD) e matéria orgânica. Tratando-se de reutilização de águas residuais, mesmo na indústria, importa ainda especificar critérios de qualidade que protejam a saúde pública em função da medida de

exposição a que são sujeitos os operadores dessa indústria e outros grupos (Monte; Albuquerque, 2010).

Sobre os parâmetros da Tabela 3.6, importa esclarecer que a sua escolha se deve ao fato de que a qualidade da água para irrigação deve considerar, principalmente, os aspectos relacionados à conservação do solo e o rendimento e qualidade das colheitas. Assim, a qualidade da água para irrigação é definida em função dos critérios de salinidade, sodicidade, toxicidade, dentre outros (Almeida, 2010).

Ainda sobre os parâmetros que devem ser observados na água a ser reutilizada, quando se trata de reutilização para rega, os constituintes microbiológicos podem assumir uma importância significativamente maior do que a dos compostos químicos, pois não se trata de reutilização direta ou indireta para produção de água potável, em que a presença no efluente reutilizado de determinados compostos, nomeadamente muitas moléculas orgânicas complexas, potencialmente cancerígenas, representa um risco significativo para a saúde pública. Por esta razão, não existem critérios de saúde pública relativos à qualidade química dos efluentes reutilizados para rega, considerando-se que a composição química das águas residuais utilizadas em irrigação pode afetar significativamente o sistema solo-planta, por absorção de substâncias fitotóxicas através das raízes ou das folhas (critérios de qualidade agronômicos), mas não implica geralmente risco significativo para a saúde pública por essa via, embora se saiba que alguns elementos tendem a acumular-se nas plantas, podendo atingir níveis tóxicos para os animais consumidores (Monte; Albuquerque, 2010).

Já os requisitos de qualidade para a reutilização de água residual tratada em usos recreativos e ambientais, a turbidez, os sólidos suspensos totais (SST), o pH, o oxigênio dissolvido (OD), os nutrientes e os coliformes fecais são parâmetros de qualidade mais relevantes, aos quais pode-se ainda acrescentar os metais pesados e compostos orgânicos residuais, pois tendem a acumular-se a níveis elevados nos tecidos de alguns membros da cadeia alimentar, como dos peixes e das aves. O uso de águas residuais tratadas para fins ambientais centra-se mais nas implicações associadas à proteção dos ecossistemas, enquanto a sua utilização para fins recreativos levanta maiores preocupações em termos de saúde pública (Monte; Albuquerque, 2010).

Quanto aos requisitos de qualidade da água residual tratada para usos urbanos não potáveis, algumas aplicações, como a construção pesada e a fusão de

neve, podem ser compatíveis com efluentes secundários, desde que utilizados de acordo com práticas corretas para proteção dos operadores, enquanto outras, como água reutilizada para descarga de sanitários, condicionamento de ar, combate a incêndios, são mais restritivas do ponto de vista da sua qualidade, pois devem apresentar características de qualidade que não favoreçam o crescimento de biofilmes nas paredes das tubulações, corrosão, incrustações e riscos para a saúde pública. Os parâmetros de qualidade mais relevantes para avaliação da qualidade da água para essa finalidade são: sólidos em suspensão, pH, turbidez, coliformes totais e fecais, sólidos dissolvidos, alcalinidade, nitrogênio (amoniacal e nítrico), sílica e cálcio (Monte; Albuquerque, 2010).

Além do estabelecimento do padrão dos compostos químicos e microbiológicos, a legislação deve prever também o monitoramento, como ocorre na legislação portuguesa através do Decreto-Lei nº 119/2019, com o objetivo de manter as características qualitativas da água residual tratada e avaliar o efeito sobre as características dos receptores, designadamente o solo, a vegetação ou os recursos hídricos. Não é toda a regulamentação que trata da reutilização de água residual tratada que inclui monitoramento, e a Resolução COEMA Nº 02/2017 é um exemplo.

Cada projeto de reutilização de águas deve incluir um plano de monitoramento para verificação da qualidade das águas residuais tratadas nos locais de produção ou entrega, armazenamento, distribuição e utilização, em função das características dos solos, vegetais e frutas, bem como para a avaliação da eficácia das medidas de minimização, para redução dos riscos ambientais e na saúde pública (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

O Anexo 1 da presente tese apresenta uma breve descrição do significado de cada um dos parâmetros presentes nas Tabelas 3.1 a 3.6, entre outros.

3.5 AVALIAÇÃO E GESTÃO DO RISCO

Além de um normativo legal que trate do padrão da água residual tratada para uma finalidade de reutilização e do programa de monitoramento, há também a necessidade de implementação de uma gestão de risco.

Quando devidamente tratada, conforme já evidenciado nos tópicos anteriores, a água residual é segura para ser reutilizada. Contudo, existem potenciais efeitos negativos associados a reutilização que podem causar impactos negativos ao ambiente e afetar a saúde pública, e que devem, pois, ser minimizados e controlados.

Para tanto, além de normas e regras que devem ser seguidas por aqueles que utilizam água residual tratada, devem-se utilizar-se ferramentas para a avaliação, minimização e gestão do risco associado.

Para cada modalidade de reutilização há riscos associados e a sua minimização é concretizada através da consideração cumulativa de barreiras múltiplas de segurança de natureza física ou química, a implementar quer pelo produtor, quer pelo utilizador (conceito multibarreira), acompanhadas de um programa de monitoramento e de um plano de gestão de risco. Ou seja, quando se pratica a reutilização de água residual tratada, deve-se identificar e avaliar as vulnerabilidades, perigos, consequências e riscos associados ao ambiente e à saúde pública e então gerir os riscos identificados de forma a minimizá-los e garantir que a qualidade da água seja mantida durante o uso para a finalidade proposta.

A qualidade mínima pode ser atingida no ponto de produção, pela introdução de barreiras físicas ou químicas ao nível de processos e operações de tratamento, ou, quando não é atingida a montante, deve ser assegurada pelo utilizador, através da introdução de outras barreiras com desempenho confiável (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

3.5.1 Avaliação do risco para o ambiente e para a saúde pública

As águas para reutilização contêm compostos químicos e microrganismos patogênicos em concentração variável, naturalmente tanto mais reduzida quanto mais elevado for o nível e eficiência das operações e processos de tratamento (barreiras físicas e químicas) introduzidas pelo produtor ou a eficácia de outras barreiras introduzidas pelo utilizador.

Na maioria das aplicações de reutilização, os riscos ambientais e sanitários decorrentes da presença desses constituintes são minimizados, porque são controlados adequadamente. No entanto, há perigos cujo risco deve ser avaliado em face das potenciais consequências, que podem ser graves, para o ambiente e saúde pública. Os microrganismos patogênicos podem provocar doenças nas pessoas e animais e alguns compostos químicos, mesmo em baixas concentrações, são perigosos para a saúde humana quando ingeridos, inalados ou em contato com a pele. Assim, a reutilização de águas apresenta riscos para o ambiente, em particular para o solo e recursos hídricos, e para a saúde pública e animal.

A avaliação do risco no contexto da reutilização de águas consiste na identificação de vulnerabilidades, perigos e consequências desta prática no ambiente e na saúde pública, em termos espaciais e temporais. O risco é definido como a probabilidade de ocorrência de efeitos negativos no ambiente e na saúde pública (consequências) associada aos perigos previamente identificados, de acordo com as características físicas, químicas e microbiológicas da água, o estado e capacidade de carga de solos e águas e a vulnerabilidade dos sistemas de controle de aplicação dessas águas. A avaliação do risco, gestão do risco e comunicação do risco são componentes fundamentais dos estudos de análise do risco, conforme Figura 3.1 (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

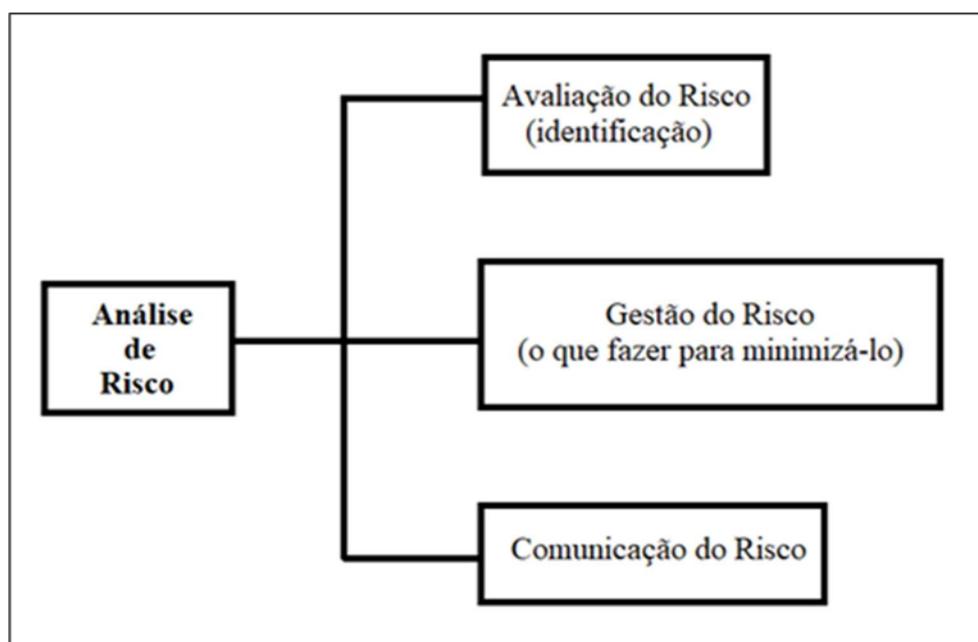


Figura 3.1 - Componentes do estudo da análise de risco

Como o processo de avaliação do risco baseia-se na previsão de cenários futuros, envolve incertezas dificilmente quantificáveis, associadas à projeção de acontecimentos, devendo as incertezas ser incorporadas nas medidas de minimização, através do uso de escalas de importância, para assim se aumentar a robustez da avaliação e consequentemente do apoio à decisão (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019)

A avaliação do risco compreende então dois grandes domínios de ação (saúde e ambiente), como ilustrado na Figura 3.2.

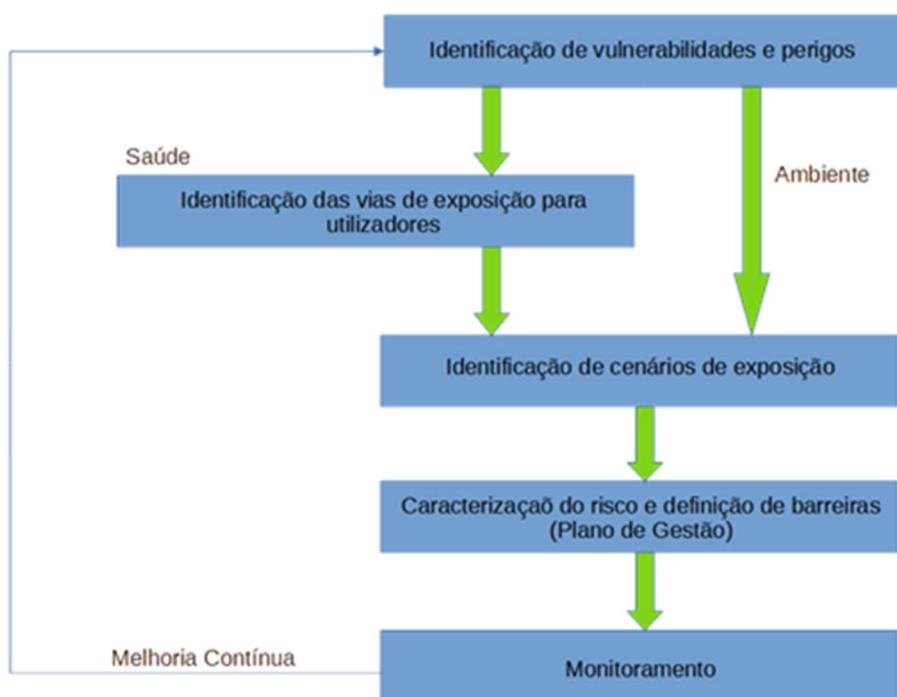


Figura 3.2 - Esquema de uma avaliação de risco em projeto de reutilização de água residual tratada, adaptada de (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022)

Domínio 1 – AMBIENTE: Eventuais riscos ambientais resultantes da aplicação de água reutilizada na irrigação e usos urbanos, nomeadamente ao seu eventual escoamento, infiltração e percolação para o solo e recursos hídricos subterrâneos ou superficiais.

Domínio 2 – SAÚDE: Eventuais riscos para a saúde pública resultantes da aplicação de água reutilizada na rega e usos urbanos, nomeadamente a sua ingestão, inalação ou absorção pela pele.

PARA O AMBIENTE

Quanto ao uso de água residual tratada na agricultura, os perigos para o ambiente estão associados às características físicas, químicas e microbiológicas das águas residuais tratadas, às características do solo e vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais, nomeadamente no que se refere ao escoamento e percolação para solos, lençóis freáticos e águas superficiais, que podem levar a salinização de solos e águas receptoras, e a riscos de toxicidade para as culturas e fauna e flora locais.

Os compostos que trazem maior perigo são a matéria orgânica biodegradável, nitrogênio (em particular o nitrato), fósforo, metais pesados, pesticidas e

poluentes emergentes (PE), como produtos farmacêuticos, produtos de higiene e disruptores endócrinos (DE), detergentes, aditivos de combustíveis e industriais, antissépticos, lubrificantes, resinas, subprodutos da desinfecção de águas (DPB), entre outros.

O potencial de contaminação, ou seja, o perigo, depende do método de irrigação utilizado (aspersão, gota-a-gota ou sub-superficial), das características das águas subterrâneas e superficiais, das propriedades do solo e das características topográficas do terreno e, portanto, deve-se definir as barreiras de proteção por parte do produtor (introdução de tratamento adicional para eliminar os compostos indesejáveis, por exemplo) e/ou do utilizador (proibição de irrigação em terrenos fraturados ou fissurados, ou em áreas em que o nível freático esteja muito próximo da superfície, por exemplo).

Quanto aos usos urbanos de água residual tratada, os perigos para o ambiente são semelhantes aos apresentados para a irrigação. No que se refere à lavagem de pavimentos, vias rodoviárias, contentores, equipamentos e veículos, alguns dos possíveis métodos de lavagem (lavadoras aspiradoras de pavimentos, lava contentores, lavagem a jato de alta pressão para veículos, por exemplo) potenciam perigos de contaminação do solo, das águas, da fauna e da flora, que devem refletir-se nas barreiras de proteção a implementar pelo produtor (introdução de tratamento adicional para eliminar os compostos indesejáveis) ou pelo utilizador (exigência de cuidados específicos na utilização dos equipamentos de aplicação por pressurização).

PARA SAÚDE PÚBLICA

Quanto ao uso de água residual tratada na agricultura, os perigos para saúde pública estão associados às características físicas, químicas e microbiológicas das águas e ao risco de ingestão, inalação ou contato dérmico quando em contato direto com pessoas, ou indireto por ingestão de animais, vegetais ou frutas contaminadas.

A grande variedade de microrganismos patogênicos e compostos químicos naturais e sintéticos presentes nas águas residuais constitui uma fonte de preocupação para a saúde pública, pois podem continuar ativos nas águas residuais tratadas. Muitos destes microrganismos são causadores de doenças transmissíveis pela água e os compostos químicos podem apresentar propriedades tóxicas, carcinogênicas,

mutagênicas, teratogênicas e inibidoras de fertilidade. Os compostos químicos que suscitam maior perigo são o nitrato, fósforo, metais pesados, pesticidas e PE.

Assim, os perigos principais associados à irrigação são a exposição de pessoas e animais às culturas irrigadas e o método de irrigação utilizado, como, por exemplo, o contato direto em espaços irrigados por aspersão, apresentando menos perigo a irrigação por gota-a-gota ou subsuperficial.

Quanto aos usos urbanos de água residual tratada, os perigos para saúde pública são semelhantes aos apresentados para a irrigação. Alguns métodos de lavagem (lavadoras aspiradoras de pavimentos, lava contentores, lavagem a jato de alta pressão para veículos, por exemplo), varrimento de coletores (desentupidores de alta pressão a hidrojato), humedecimento do solo (com caminhões com capacidade de pulverização), combate a incêndios (agulhetas) e tipos de aparelhos sanitários (exteriores com tampa removível), potenciam perigos de contaminação de pessoas e animais. As barreiras de proteção podem ser implementadas a montante, ao nível do produtor (remoção adicional de microrganismos patogênicos ao nível do tratamento adicional), ou a jusante, ao nível do utilizador (restrição de acesso de pessoas e animais aos locais de aplicação, recurso a equipamentos de limpeza de baixa pressão e ao humedecimento dos solos por gotejamento, ou substituição de aparelhos sanitários exteriores pelos embutidos na parede).

Assim, constituem os principais perigos associados aos usos urbanos: os sistemas de lavagem e humedecimento de solos por equipamentos de alta pressão, o recurso a agulhetas de alta pressão para combate a incêndios e os aparelhos sanitários com descarga exterior com tampa removível, apresentando um menor perigo o recurso a sistemas de lavagem de baixa pressão, humedecimento do solo por gotejamento ou a utilização de aparelhos sanitários com descarga embutida na parede.

3.5.2 Gestão do risco

A minimização dos riscos é alcançada pela aplicação de barreiras múltiplas ajustadas a cada projeto de reutilização de águas (conceito de multibarreira). Este procedimento consiste na imposição de barreiras de segurança ao nível do tratamento das águas residuais (barreiras ao nível do produtor) e de barreiras para minimizar o risco de escoamento, infiltração e percolação das águas residuais tratadas reutilizadas, e assim evitar o transporte e arraste de contaminantes e microrganismos patogênicos para os recursos hídricos subterrâneos e superficiais ou seu contato direto ou indireto com

utilizadores, nomeadamente por ingestão, inalação ou contato com a pele (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

A implementação de medidas com base na conjugação de múltiplas barreiras para obtenção de efeito multibarreira pode permitir a utilização de água residual tratada de menor qualidade ao nível do produtor para um uso mais exigente ao nível do utilizador. Neste caso, as medidas de prevenção ou controle ao nível do utilizador devem permitir alcançar um menor valor de risco, compatível ou equivalente à aplicação de um normativo mais exigente (barreira equivalente). As barreiras podem ser utilizadas individualmente ou em conjunto (efeito multibarreira), resultando, neste último caso, naturalmente numa redução do risco (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

A seguir tem-se a Tabela 3.7 com algumas barreiras que podem ser utilizadas individualmente, ou em conjunto para reduzir o risco para o ambiente (solo e recursos hídricos) e para saúde pública, resultante do contato direto ou indireto com a água residual tratada reutilizada.

A barreira, ou conjunto de barreiras, que produz um resultado equivalente a uma certa redução de perigo e risco associado a microrganismos patogênicos (risco para saúde), é definida como barreira-equivalente, apresentando-se alguns exemplos na Tabela 3.8. Na avaliação de risco ambiental não se aplica o conceito de barreira-equivalente, porque cada barreira é considerada como uma medida de minimização singular.

Após a definição das barreiras, procede-se à classificação do risco associado às aplicações de água residual tratada, em função da perigosidade e da probabilidade de falha das medidas de minimização (barreiras). As barreiras aplicadas a cada aplicação devem ser selecionadas pelo critério de minimização de impacto ambiental negativo ou redução do contato de pessoas e animais com as águas residuais tratadas.

Tabela 3.7: Barreiras que podem ser utilizadas para reduzir o risco para o ambiente e para saúde pública (adaptada de (Albuquerque *et al.*, 2022))

AMBIENTE	SAÚDE PÚBLICA
Definir restrições de acesso aos locais de produção, armazenamento, distribuição e aplicação (utilizador)	Definir restrições de acesso aos locais de produção, armazenamento, distribuição e aplicação (utilizador)
Evitar o transporte em sistemas abertos como canais ou valas, privilegiando o transporte por tubulação enterrada (utilizador)	Introduzir tratamento adicional ou terciário, à base de filtração e desinfecção por tecnologias de radiação ultra-violeta ou equivalente (produtor)
Não aplicar em solos argiloso, fraturados ou fissurados (utilizador)	Evitar sistemas de irrigação por aspersão, privilegiando a irrigação gota-a-gota ou subsuperficial, ou ainda evitar a lavagem de superfícies por jato em locais de acesso público (utilizador)
Não aplicar em superfícies de terreno com inclinações superiores a 8% (utilizador)	Utilizar coberturas em material plástico resistente ao sol para separar o solo das plantas em sistemas de irrigação gota-a-gota (utilizador)
Não aplicar em solos onde o nível freático, no período mais crítico do ano em termos de precipitação, é inferior a 3 m	Suspender a irrigação num período adequado, antes das operações de colheita (utilizador)
Os reservatórios e redes de distribuição/aplicação não devem ser implantados a menos de 50 m de linhas de cota máxima de cheias, locais de captação de águas subterrâneas, e de cursos de água, lagos e albufeiras (utilizador)	Utilizar horários de irrigação ou lavagem fora das horas de utilização dos espaços (utilizador)
	Implantar os sistemas de armazenamento e distribuição/aplicação a mais de 200 m de habitações (utilizador)
	Não utilizar para irrigação de culturas destinadas a consumo em cru para pessoas ou animais (utilizador)
	Não utilizar para irrigação de culturas destinadas à alimentação de suínos, uma vez que é um vetor de elevado risco para a saúde (utilizador)
	Evitar usar equipamentos de lavagem de alta pressão para o humedecimento de solos (utilizador)
	Utilizar aparelhos sanitários embutidos na parede ao invés de descarga externa com tampa amovível (utilizador)

Tabela 3.8: Tipos de barreiras e barreiras-equivalentes para redução de carga microbiológica (adaptada de (Albuquerque *et al.*, 2022))

BARREIRA	Redução de Microrganismos indicadores ou patogênicos (\log_{10})	Nº de barreiras-equivalentes
Tratamento secundário	0,5 a 3	1 a 2
Tratamento adicional com filtração em meio granular ¹	2 a 4	1 a 2
Tratamento adicional com filtração em membrana ²	4 ^a 6	2 a 3
Tratamento adicional com desinfecção ³	2 a 6	1 a 3
Irrigação gota-a-gota para culturas de crescimento lento (≥ 25 cm do solo)	2	1
Irrigação gota-a-gota para culturas de crescimento elevado (≥ 50 cm do solo)	4	2
Irrigação subsuperficial	6	3
Coberturas resistentes ao sol	2 a 4	1 a 2
Secagem de culturas ao sol antes da colheita (ex: girassol)	2 a 4	1 a 2
Cessação da irrigação ou interrupção em período de tempo anterior à colheita	0,5 a 2 ⁴	1 ⁴
Restrição de acesso de pessoas e animais, pelo menos 24 horas após a irrigação	0,5 a 2	1
Restrição de acesso de pessoas e animais, pelo menos 5 dias após a irrigação	2 a 4	1 a 2
Restrição de acesso durante as horas de irrigação em áreas públicas, de lazer ou desportivas (ex: irrigação noturna)	0,5 a 1	1

¹Por exemplo: filtro de areia ou antracito com carvão ativado

²por exemplo: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração ou osmose inversa

³por exemplo: cloração ou radiação ultravioleta

⁴por dia, tempo seco

Em termos de perigosidade, definiram-se quatro classes (Tabela 3.9), conforme (Albuquerque *et al.*, 2022), de acordo com a probabilidade do perigo ter ocorrido no passado ou para as vulnerabilidades apresentadas poderem ser baixa, média, alta e muito alta. O risco foi, assim, classificado qualitativamente em “Baixo”, “Médio”, “Alto” e “Muito Alto” em função da associação entre a periculosidade e a eficiência das barreiras, como apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.9: Classes e Perigosidades. Fonte: (Albuquerque *et al.*, 2022)

PERICULOSIDADE	DESCRIÇÃO
Baixa	Não há evidência do perigo ter ocorrido no passado ou a vulnerabilidade é baixa
Média	Há evidência do perigo ter ocorrido no passado, mas não há registros ou a vulnerabilidade é média
Alta	Há registros de ocorrência do perigo em alguns casos no passado ou a vulnerabilidade é alta
Muito Alta	Há registros de ocorrência frequente do perigo no passado ou a vulnerabilidade é alta

Tabela 3.10: Classificação do risco para os usos previstos. Fonte: (Albuquerque *et al.*, 2022)

		PERIGOSIDADE			
		BAIXA	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
EFICIÊNCIA DAS BARREIRAS	BAIXA	Alto	Alto	Alto	Muito Alto
	MÉDIA	Médio	Médio	Alto	Alto
	ALTA	Baixo	Médio	Médio	Alto
	MUITO ALTA	Baixo	Baixo	Baixo	Médio

Pelo exposto, a análise do risco é, assim, qualitativa, e pode ser feita parâmetro a parâmetro, de acordo com o padrão estabelecido para o local da reutilização (para o Ceará, considera-se a Resolução COEMA Nº 02/2017), para cada modalidade de reutilização, podendo ser equacionados vários cenários para a mesma finalidade de reutilização. Quando o risco inerente a determinado parâmetro for “Muito Alto” que acarrete impactos ambientais negativos significativos no ambiente ou danos elevados para a saúde pública, o projeto de reutilização de águas deverá ser considerado inviável (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

Se o risco, para cada oportunidade de aplicação de água residual tratada, for “Médio”, “Alto” ou “Muito Alto”, devem ser introduzidas novas medidas de minimização a fim de o reduzir. Ou seja, devem ser implementadas novas barreiras e voltar a ser avaliado o risco até que se obtenha a classificação de risco “Baixo”. Apenas com uma avaliação de Baixo Risco se deverá abrir a possibilidade da não satisfação integral dos valores constantes nos normativos que estabelecem a qualidade que a água deve ter para ser reutilizada, conforme decisão excepcional do órgão licenciador. Ou seja, as medidas de prevenção ou controle ao nível do utilizador devem permitir alcançar um

valor de risco menor, compatível ou equivalente à aplicação de um normativo mais exigente (barreira-equivalente) (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

Além da definição de medidas de minimização com introdução de barreiras de proteção, deverão ser igualmente elaborados planos de gestão de risco com regras para controle e gestão de infraestruturas e equipamentos, monitoramento de parâmetros de qualidade e desempenho para garantia da segurança das águas residuais tratadas e sua aplicação (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

A verificação da qualidade das águas reutilizadas nos locais de produção ou entrega, armazenamento e utilização devem ser efetuada com base em amostras compostas representativas de um período de 24 horas, exceto para os parâmetros microbiológicos, que devem ser avaliados por amostras pontuais. Sempre que não seja viável a coleta de amostras compostas a amostragem pode ser, em alternativa, pontual (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

O bom desempenho dos sistemas de armazenamento é crucial para compensar a flutuação dos consumos ao longo do dia (reserva interhorária), bem como de dia para dia (reserva interdiária), ou seja, como volante de regularização, e ainda para permitir o adequado funcionamento das redes de distribuição (com pressão suficiente), função de equilíbrio de cargas piezométricas, regularização dos bombeamentos, bem como para reservas de emergências (falhas pontuais na adução, por perturbações do sistema adutor, ou por alterações da qualidade da água) (Albuquerque; Ferreira; Matos, 2022; Machado *et al.*, 2019).

4. INDICADORES E PARÂMETROS RELACIONADOS COM A REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De acordo com o relatado nos capítulos anteriores, a implementação de projetos de reutilização de água residual tratada depende de uma série de fatores, nomeadamente fatores técnicos, ambientais, econômicos e sociais.

De forma resumida, pode-se citar que a escassez hídrica, a demanda, a opinião pública, as tecnologias de tratamento de água residual, os custos envolvidos com o tratamento e com as infraestruturas e a legislação são importantes variáveis influenciadoras do sucesso dos projetos de reutilização.

Diante da realidade da baixa percentagem de reutilização no mundo, com algumas exceções, e considerando a alta demanda de água em alguns setores da economia, a escassez hídrica em algumas regiões e o grande volume de esgoto produzido, a principal questão que permanece é que estratégias devem ser implementadas, seja a nível nacional ou regional, para aumentar a aceitação e a difusão da reutilização de água.

Nessa perspectiva, a presente tese buscou desenvolver um modelo que auxiliasse os decisores quanto a opção de reutilização em um determinado município ou região. Segundo Schutter (2007), um sistema de apoio à decisão adequado deve fornecer um ambiente de trabalho fácil de usar, para o desenvolvimento, processamento e análise de alternativas de decisão. O modelo matemático obtido tem que levar em consideração as variáveis relacionadas com a reutilização, de forma a refletir, verdadeiramente, a realidade de que depende a reutilização.

Já é possível perceber que a prática da reutilização da água deve basear-se não só no conhecimento científico e tecnológico do tratamento de águas residuais, mas também em um adequado enquadramento institucional e regulamentar, bem como no apoio público a esta estratégia de gestão sustentável dos recursos hídricos.

A partir do que foi relatado até aqui, portanto, é possível identificar os indicadores e parâmetros que são relevantes para uma decisão de reutilização de água residual tratada.

4.2 INDICADOR TÉCNICO

O indicador técnico está relacionado com as tecnologias de tratamento de efluentes disponíveis, bem como com a sua confiabilidade, com a solução de transporte da água residual tratada até o local onde será reutilizada e com o seu armazenamento.

A confiabilidade depende do padrão de qualidade exigido, ou seja, depende da existência de legislação. Quanto melhor a qualidade necessária para a água residual tratada, mais etapas de tratamento são requeridas. A confiabilidade, portanto, está relacionada com a segurança e a resiliência da ETAR.

Outro parâmetro do indicador técnico que deve ser levado em consideração é a utilização de barreiras, ou conjunto de barreiras (efeito multibarreira ou barreira-equivalente), no âmbito da avaliação e gestão do risco. A implantação de barreiras pode ser efetivada ao nível do produtor (na ETAR) e/ou ao nível do utilizador (local onde a água é reutilizada) e visa permitir o uso de água residual tratada de menor qualidade ao nível do produtor para um uso mais exigente ao nível do utilizador. O Capítulo 3 da presente tese traz detalhes sobre o processo de avaliação e gestão do risco e sobre o conceito de barreiras múltiplas e barreira-equivalente.

Nem todas as estações de tratamento de águas residuais contemplam todas as fases de tratamento. A definição do nível de tratamento é uma decisão tomada no momento em que se verifica a necessidade de implantação da ETAR, do nível de qualidade exigido na legislação e, mais recentemente, da finalidade de reutilização que se queira fazer, também com base em legislação (Nakazato & Rodrigues, 2009).

Frisa-se, mais uma vez, que o nível de tratamento está relacionado com o padrão requerido na legislação, cuja finalidade é evitar a poluição do corpo receptor (quando há lançamento direto) ou garantir a segurança da reutilização, quando essa é a finalidade. Conforme Nakazato & Rodrigues (2009) e Sperling (1995), os níveis de tratamento podem ser classificados em cinco, em ordem crescente de eficiência. São eles:

- Tratamento Preliminar
- Tratamento Primário
- Tratamento Secundário
- Tratamento Terciário

- Tratamento Avançado (ou Quaternário)

Cada uma destas etapas objetivam a remoção de materiais específicos do esgoto. Geralmente as ETAR's apresentam esta mesma sequência em suas configurações, uma vez que a segunda etapa geralmente não consegue remover o que a etapa anterior remove. Porém, em algumas situações específicas, pode verificar-se a supressão de uma das etapas.

O nível de tratamento depende da qualidade requerida para água residual tratada, que por sua vez deve estar estabelecida em legislação. Logo, a existência ou não de um dispositivo legal que inclua o padrão de qualidade recomendado para uma determinada finalidade de reutilização da água também está relacionada com o indicador técnico.

Portugal publicou, em 2019, legislação específica para reutilização de água residual tratada. No Brasil, não há uma legislação nacional que indique o padrão de qualidade da água residual para fins de reutilização em todo o território brasileiro, mas existem normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas bem como experiências estaduais. No Capítulo 3 desta tese apresenta-se a legislação cearense e portuguesa no tema de reutilização.

4.3 INDICADOR AMBIENTAL

Enquanto o acesso à água potável está ficando cada vez mais difícil e caro devido à poluição ambiental, às alterações climáticas e ao aumento da demanda, o uso de água para finalidades não potáveis pode ser suprido por esgoto tratado adequadamente (Baresel *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a qualidade da água a ser reutilizada é determinante não somente em função de suas características físicas, químicas e biológicas, como também da adequação ao uso a que se destina. Os efeitos negativos da reutilização de água residual, nomeadamente os decorrentes do uso na agricultura, como, por exemplo, contaminação da água subterrânea por nitratos, patógenos e salinização do solo, podem ser superados pelo uso de esgotos predominantemente domésticos, eficientemente tratados e pelo uso de técnicas adequadas de irrigação.

As águas residuais contêm constituintes químicos e microbiológicos que não são totalmente removidos ou inativados nas estações de tratamento. O residual

de alguns desses constituintes presentes nos efluentes tratados pode constituir a causa de alguns riscos para a saúde pública e para o ambiente. O controle desses riscos baseia-se no conhecimento da sua proveniência e dos impactos sobre a saúde humana e no ambiente em geral.

Superados os pontos negativos, uma das vantagens da reutilização de água residual tratada é que, ao se reutilizar o efluente tratado, evita-se o seu lançamento no solo ou em corpos d'água receptores, como normalmente é feito e, dessa forma, evita-se a possível poluição do solo e de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Em áreas costeiras, por exemplo, que sofrem com intrusão salina pelo excesso de uso do manancial subterrâneo, a reutilização de água pode ser benéfica tanto por ser mais uma fonte de água e, dessa forma, reduzir o bombeamento de água subterrânea, como também pela possibilidade de se fazer recarga de aquífero com o efluente tratado, constituindo uma barreira à intrusão salina.

Apesar de já existirem tecnologias capazes de tratar esgoto de forma a produzir água de qualquer qualidade, dentro dos mais variados padrões exigidos para várias finalidades, a reutilização de água não é algo simples e direto, sendo necessária quantidade significativa de energia, de materiais e de outros recursos, que devem ser levados em consideração nos projetos de reutilização (Baresel *et al.*, 2015).

Como dito, a produção de efluente com qualidade para ser reutilizado não é tão simples. Isso porque o tratamento tradicional, normalmente finalizado na etapa secundária, não remove substâncias que precisam estar ausentes em algumas finalidades de reuso, tais como sólidos, organismos patogênicos, micropoluentes e contaminantes emergentes. Para removê-los, são frequentemente necessários o tratamento terciário e uma desinfecção, o que normalmente é acompanhado de elevação de gasto energético e aumento do uso de substâncias químicas (Baresel *et al.*, 2015).

Quanto aos patógenos, a sua eventual presença constitui muitas vezes a preocupação dominante em projetos de reutilização, pelo risco da água reutilizada constituir um veículo de transmissão de doenças e poder, assim, configurar um problema de saúde pública e/ou animal. A água, como qualquer outra substância, contém grandes quantidades de microrganismos – bactérias, algas, protozoários, fungos, vírus e crustáceos – a grande maioria dos quais é inofensiva para o Homem. Porém, alguns microrganismos são patogênicos e a sua presença na água faz desta

um veículo privilegiado de transmissão de numerosas doenças, algumas muito perigosas, causa de elevadas taxas de mortalidade nos países em desenvolvimento, principalmente na população infantil (Monte & Albuquerque, 2010). A Tabela 4.1 apresenta os microrganismos patogênicos mais comumente encontrados nas águas residuais e as doenças por eles causadas.

Tabela 4.1 – Microrganismos patogênicos normalmente presentes nas águas residuais e doenças associadas

(continua)

GRUPO	MICRORGANISMO PATOGÊNICO	DOENÇAS CAUSADAS
Bactérias	<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite
	<i>E. coli</i> patogénica	Enterite, diarréia
	<i>Salmonella</i>	
	<i>S. typhi</i>	Febre tifóide
	<i>S. paratyphi</i>	Febre paratifóide
	Outras espécies	Salmoneloses
	<i>Shigella</i> spp	Desinteria bacilar
	<i>Vibrio. Cholerae</i>	Cólera
	Outros vibriões	
Protozoários	<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenterite e septicemia
	<i>Balantidium coli</i>	Diarreia, desinteria e úlcera do cólon
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Úlcera do cólon, desinteria amibiana e abcesso do fígado
Helmintas	<i>Giardia lamblia</i>	Diarreia e má absorção
	<i>Ancylostoma uodenal</i>	Ancilostomíase
	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascaridíase
	<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobíase
	<i>Hymenolepsis nana</i>	Himenolepíase
	<i>Necator americanus</i>	Ancilostomíase

Tabela 4.1 – Microrganismos patogênicos normalmente presentes nas águas residuais e doenças associadas

(conclusão)

GRUPO	MICROORGANISMO PATOGÊNICO	DOENÇAS CAUSADAS
Helmintas	<i>Strongyloides stercoralis</i>	Estrongiloidíase
	<i>Taenia saginata</i>	
	<i>e Taenia solium</i>	Teníase
	<i>Trichuris trichura</i>	Tricuríase
	Enterovírus	
	Poliovírus	Paralisia, meningite asséptica A – Paralisia, meningite asséptica, febres, doenças respiratórias
Vírus	Coxaquienvírus	B – Paralisia, meningite asséptica, pericardites, miocardites, doenças cardíacas congénitas, pleurodinia
	Ecovírus	Infecções respiratórias, meningite asséptica, diarreia, pericardite, miocardite, prurido, febre.
	Reovírus	Doenças respiratórias, gastroenterites
	Adenovírus	Conjuntivite aguda, diarreia, doenças respiratórias
	Rotavírus	Gastroenterite infantil
	Vírus da hepatite A e E	Hepatite A
	Calivivírus	Gastroenterites, diarreias

Fonte: Monte & Albuquerque, (2010)

No contexto da qualidade microbiológica das águas residuais tratadas, é importante mencionar a pandemia de COVID-19, causada pelo coronavírus SARS-CoV-2. Segundo Mancuso *et al.*, (2021), até o momento não há relatos consolidados na literatura de que uma pessoa possa ser contaminada com SAR-CoV-2 tendo contato direto ou indireto com esgoto sanitário, mas há pesquisadores que

conseguiram isolar esse vírus vivo das fezes e da urina de pessoas infectadas e demonstraram que a rota de transmissão feco-oral deve ser considerada.

Mesmo com indícios de que a principal via de transmissão do vírus da COVID-19 seja inalação de aerossol de pessoa para pessoa, torna-se necessária a realização de estudos mais abrangentes em relação a rota de transmissão por esgotos (Mancuso *et al.*, 2021).

Em 2004, ocorreu um surto de SARS na China e, na época, o RNA de SARS-CoV foi detectado em 100% das amostras de esgotos não tratados e em 30% das amostras de esgotos tratados. Já na França, um estudo detectou o RNA SARS-CoV em esgotos tratados, com concentrações de até 105 cópias/litro. A presença de RNA viral nas amostras de esgotos, entretanto, não está relacionada com a transmissão do vírus, mas sim, apenas identifica sua presença ou ausência (Mancuso *et al.*, 2021).

Quanto ao tratamento do esgoto com a finalidade de eliminar o vírus de COVID-19, ainda não existem respostas sobre processos ou tecnologias capazes de eliminá-lo, uma vez que se trata de um vírus novo, com poucos estudos.

Especificamente sobre a tecnologia de tratamento de esgoto visando eliminar o SARS-CoV-2, há um estudo sendo desenvolvido com a tecnologia HyDOZ (Hyper Concentrade Dissolved Ozone), atualmente em funcionamento na ETAR de Paul R. Noland, na cidade de Fayetteville, Estados Unidos, em parceria com a empresa Blue Ingreen LLC e a Universidade do Arkansas. Essa tecnologia usa o gás ozono como agente desinfetante (Mancuso *et al.*, 2021).

A forma de exposição aos patógenos varia de acordo com a finalidade e a forma da reutilização, conforme indicado na Tabela 4.2, podendo ser uma exposição máxima se houver ingestão de culturas regadas com água reutilizada, contato direto do corpo com superfícies molhadas com essa água ou inalação de aerossóis com essa origem. Mesmo nestas situações de máxima exposição, a intensidade pode ser muito reduzida, se o nível de tratamento das águas residuais reduzir a presença de microrganismos indicadores a teores muito baixos (Monte & Albuquerque, 2010).

Tabela 4.2 – Meios de exposição relacionados a finalidade da reutilização da água

Finalidade da Reutilização	Meios de Exposição
Reutilização na Agricultura	<ul style="list-style-type: none">- Consumo de plantas regadas com água reutilizada;- Consumo de carne e outros produtos de animais alimentados com plantas regadas com água reutilizada;- Contato com solo, plantas e equipamentos utilizados na aplicação da água reutilizada;- Exposição a aerossóis formados na rega por aspersão
Reutilização para rega paisagística	<ul style="list-style-type: none">- Contacto com solo, plantas e equipamentos utilizados na aplicação da água reutilizada;- Exposição a aerossóis formados na rega por aspersão.
Reutilização industrial	Eventual exposição a salpicos de água em operações de lavagem de equipamento, de pavimentos.
Usos recreativos e ambientais	Contacto com a água, plantas e animais aquáticos
Reutilização para usos urbanos não potáveis	<ul style="list-style-type: none">- Ligações cruzadas com a rede de abastecimento de água potável;- Exposição a aerossóis formados na lavagem de veículos no combate a incêndios.

Fonte: Monte & Albuquerque, (2010)

De um modo geral, a concentração de poluentes químicos perigosos em águas residuais tratadas é muito reduzida, frequentemente da mesma ordem de grandeza dos valores de concentração encontrados em águas subterrâneas,

nomeadamente no que concerne aos metais pesados, pesticidas e produtos farmacêuticos (Monte & Albuquerque, 2010).

Especificamente sobre os compostos não completamente removidos, Monte & Albuquerque, (2010) afirmam que na maioria das aplicações de reutilização, os riscos sanitários e ambientais decorrentes da presença desses constituintes são considerados praticamente inexistentes, porque são controlados adequadamente. Porém, eles ressaltam que há perigos cujo risco deve ser avaliado. A presença de alguns constituintes representa, em alguns casos, um benefício, como na reutilização na agricultura, através da fertilização proporcionada pelo conteúdo das águas residuais em nitrogênio (azoto) e fósforo.

As tecnologias atualmente disponíveis para tratamento de águas residuais permitem a eliminação praticamente completa de qualquer tipo de poluente químico e de microrganismos patogênicos presentes nas águas residuais, possibilitando a produção de água que satisfaça todos os critérios de qualidade de água para consumo humano a partir de águas residuais. Na grande maioria das aplicações de reutilização de água não é necessária a produção de água potável e o tratamento complementar para possibilitar a reutilização das águas residuais tratadas consiste na sua desinfecção e tratamento de preparação para desinfecção (essencialmente, redução da turbidez) (Monte & Albuquerque, 2010).

De todo modo, é importante conhecer os riscos associados e a avaliação de risco compreende: a caracterização dos efeitos na saúde (perigos); a estimativa da probabilidade de ocorrência desses efeitos, que está relacionada com o tipo e intensidade de exposição ao fator de risco; o número de casos afetados por tais efeitos; e a proposta (quando possível) de concentração aceitável do constituinte que induz o risco do perigo acontecer (Monte & Albuquerque, 2010).

A nível global, a reutilização de água expandiu-se desde a rega agrícola ou de espaços verdes e de usos urbanos restritos até os usos potáveis (indiretos e diretos), tendo as águas residuais tratadas passado a ser encaradas como uma nova origem de água, adicional, alternativa para múltiplos fins. No entanto, é importante garantir que os possíveis efeitos adversos sobre a saúde e o ambiente não tenham expressão, o que leva a uma necessidade premente de definição de normas de qualidade.

Contudo, embora importantes, as normas numéricas aplicadas de forma indiscriminada a uma lista de contaminantes químicos e microbiológicos não garantem

por si só o nível de segurança requerido em termos de utilização de águas residuais tratadas. Torna-se ainda necessário uma nova abordagem, dirigida a cada projeto, vulgarmente designada por *fit-for-purpose*, suportada na avaliação do risco inerente à prática, que preconize a adoção de normas suportadas nessa mesma avaliação bem como o seguimento dos projetos de reutilização através de planos de gestão de risco, que contemplem múltiplas medidas de controle, ou barreiras, e planos de monitoramento a fim de reduzir os riscos para um nível aceitável.

Quanto ao uso de energia no tratamento de águas residuais, especialmente eletricidade, é o principal aspecto ambiental considerado em alguns estudos, especialmente quando essa energia é originária de fontes fósseis (Baresel *et al.*, 2015).

As melhorias ambientais associadas a reutilização de água, principalmente em termos de proteção aos recursos hídricos, e o incentivo proporcionado para construção de sistemas de coletas e tratamento de esgotos, são extremamente relevantes. Esses benefícios são tão importantes que tornam meramente subsidiárias as análises de custo/benefício como elementos de decisão para implementação de projetos de reutilização, principalmente em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

De forma resumida, o indicador ambiental leva em consideração os parâmetros relacionados com o gasto energético, com a qualidade dos recursos hídricos e do solo que serviria de corpo receptor do efluente tratado e com os riscos para a saúde pública decorrente do uso de uma água de menor qualidade.

4.4 INDICADOR SOCIAL

A crise global da água transcende as fronteiras geográficas e afeta desproporcionalmente as comunidades mais vulneráveis em todo o mundo. Diante dessa realidade, a reutilização de água residual tratada emerge não apenas como uma solução técnica para a escassez hídrica, mas também como uma questão social intrinsecamente ligada ao bem-estar humano e à justiça ambiental.

Em muitas regiões, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas e em países em desenvolvimento, o acesso à água potável é limitado, e as populações enfrentam desafios significativos de saneamento básico. A reutilização de água residual tratada apresenta-se como uma alternativa viável para suprir essa

demanda crescente por água segura, mitigando a pressão sobre os recursos hídricos naturais e reduzindo a exposição a doenças transmitidas pela água.

Entretanto, a implementação de programas de reutilização de água residual tratada não é isenta de desafios sociais. Em muitas comunidades, existem preocupações legítimas quanto à segurança e à qualidade da água tratada, bem como questões culturais e sociais relacionadas à aceitação pública da reutilização de águas residuais. A falta de confiança nas autoridades e nas instituições governamentais pode alimentar resistências e gerar barreiras à adoção dessas práticas.

Embora o progresso tecnológico confira segurança para a reutilização de água residual tratada, quando não há uma devida comunicação acerca dessa segurança para o público diretamente afetado pela prática do reuso, a desconfiança impera e atrapalha a implementação do projeto pela falta de apoio popular. Isso ocorre porque a sensação de risco pelo consumo de produtos irrigados com água de baixa qualidade, leva a problemas de aceitação.

O público é um dos principais interessados em qualquer decisão de gestão da água, e os membros de uma comunidade geralmente desempenham um papel importante na tomada de decisão sobre projetos de reutilização de água. Como acontece com qualquer projeto de água, o sucesso ou fracasso de um projeto de reutilização proposto pode refletir a percepção pública de como o projeto se relaciona com saúde pública, segurança, proteção ambiental e crescimento econômico. No Estado da Califórnia, Estados Unidos da América, por exemplo, um projeto de reuso para fins potáveis não foi bem-sucedido na década de 90 devido, principalmente, a uma forte oposição da opinião pública. Tal situação, segundo Duong & Saphores (2015), pode ser explicada pelo fato de as preocupações públicas não terem sido adequadamente consideradas, ao aparente favorecimento de uma área restrita e à opiniões conflitantes de especialistas.

Existe na sociedade uma repulsa natural à água que é definida como contaminada, e às vezes esse sentimento pode-se traduzir em oposição à utilização de águas residuais tratadas, mesmo quando a água é comprovadamente de alta qualidade. Em alguns casos, as pessoas podem até preferir água de baixa qualidade de uma fonte “natural” em detrimento de água de alta qualidade proveniente de uma instalação avançada de tratamento de águas residuais. A utilização de águas residuais tratadas causa uma barreira psicológica para muitos que é importante

superar, promovendo a divulgação da reutilização de água, garantindo um sistema de controle das várias etapas do processo que transmitam segurança na utilização.

Além disso, é crucial considerar os impactos socioeconômicos da reutilização de água residual tratada. Embora essa prática possa gerar benefícios econômicos significativos, como a redução dos custos de tratamento de água e o aumento da disponibilidade de recursos hídricos para usos não potáveis, é essencial garantir que tais benefícios sejam distribuídos de maneira equitativa e que as comunidades mais marginalizadas não sejam deixadas para trás.

Um dos motivos do baixo percentual de reutilização de água residual tratada em Portugal, segundo Monte & Albuquerque (2010) é, por exemplo, a existência de receio, associado a algum desconhecimento, por parte dos promotores de projetos de reutilização e até das autoridades envolvidas na aprovação e licenciamento desses projetos, face aos riscos de ordem sanitária e ambiental.

Nos países em desenvolvimento isso torna-se ainda mais grave por conta do difícil acesso a tecnologias de tratamento adequadas, uma vez que efluente tratado pode ser transmissor de organismos patogênicos e substâncias químicas potencialmente perigosas. Tal dificuldade de acesso pode ser justificada pelos custos de construção, operação e manutenção de uma ETAR, custos esses que, somados aos de distribuição e monitoramento do sistema de reuso, tornam essa prática difícil de ser implementada em algumas regiões do globo (Arborea *et al.*, 2017; Giannoccaro *et al.*, 2019).

A utilização da água com qualidade inferior, sem a necessidade de atendimento ao padrão de potabilidade, mas apropriada aos fins a que se destina e produzida a partir da afinação de efluentes tratados, permitirá que um considerável volume de água seja poupado para o abastecimento público, o que é social, sanitária e economicamente justificado, especialmente em períodos de estiagem prolongada.

A educação pública desempenha um papel fundamental na promoção da conscientização sobre os benefícios da reutilização de água residual tratada e na construção da confiança do público. Programas educacionais e campanhas de sensibilização devem ser desenvolvidos em colaboração com as comunidades locais, levando em consideração suas preocupações e perspectivas específicas.

Além disso, é essencial adotar abordagens participativas e inclusivas na formulação de políticas e na tomada de decisões relacionadas à reutilização de água

residual tratada, garantindo a representação e a participação ativa de todas as partes interessadas, especialmente das comunidades afetadas.

Em suma, a reutilização de água residual tratada não é apenas uma questão técnica ou ambiental, mas também uma questão social complexa que requer uma abordagem holística e integrada. Ao reconhecer e enfrentar os desafios sociais associados a essa prática, é possível avançar em direção a um futuro mais sustentável e equitativo, onde todos tenham acesso a água segura e de qualidade.

O indicador social está relacionado, assim, com o grau de aceitação da população usuária da água de reuso e do grau de necessidade de água no local, ou seja, da relação demanda com o suprimento (escassez hídrica). Quanto maior a escassez de recursos hídricos, maior é a tendência para a prática da reutilização de água.

Ao indicador social também está associado o percentual de cobertura de coleta e tratamento de efluentes domésticos, visto indicar o grau de desenvolvimento social de uma comunidade. Quanto maior esse percentual, mais desenvolvida estará a comunidade e mais água estará disponível para ser reutilizada.

4.5 INDICADOR ECONÔMICO

O indicador econômico está relacionado com a viabilidade econômica dos tratamentos de águas residuais em conjunto com o impacto econômico da escassez hídrica. Ou seja, ao se avaliar a viabilidade econômica da implantação de um projeto de reutilização de água, tem que ser verificado os custos da instalação, operação e manutenção de uma ETAR ou de investimento em adequações e melhorias na ETAR existente, além de investimento em infraestrutura de armazenamento, transporte e distribuição, custos com pessoal técnico especializado, sem esquecer, é claro, do impacto econômico da escassez hídrica, seja ela uma condição natural ou prevista por conta das alterações climáticas, e também o impacto da conservação dos recursos hídricos que serviriam de corpo receptor do efluente tratado.

Nos países onde a reutilização da água já constitui uma prática comum, a maior dificuldade geralmente associada ao desenvolvimento de sistemas de reutilização de águas residuais tratadas reside no seu custo. De um modo geral, a reutilização do efluente de uma ETAR só é economicamente atrativa se os locais de aplicação da água se situarem nas proximidades, pois caso contrário, é-se obrigado

a elevados investimentos em sistemas de transporte. Obviamente, o peso do fator custo, determinado pela distância entre a origem da água (ETAR) e o local da sua utilização, depende da pressão da procura da água e da eventual disponibilidade de outras origens de água alternativas, como a água dessalinizada, por exemplo (Monte & Albuquerque, 2010).

Investir em um sistema de reutilização de água é uma decisão complexa, com custos e benefícios que se estendem por muitos anos. Geralmente, a reutilização de água é mais cara do que captar água de uma origem natural de água doce, mas é mais barata do que a dessalinização da água do mar ou do que construir novas barragens para regularização. Em muitos casos, as origens de água de “baixo custo” já estão sendo utilizadas, e por isso o custo de reutilização da água deve ser comparado com o custo de qualquer nova origem de água disponível. Os custos de reutilização da água variam muito de um lugar para outro, dependendo da localização, requisitos de qualidade da água, métodos de tratamento, necessidades do sistema de distribuição, custos de energia, taxas de juros, incentivos e muitos outros fatores.

Devem também ser considerados os custos não monetários e os benefícios associados aos projetos de reutilização, nomeadamente a garantia de disponibilidade do fornecimento de água em épocas de seca, a expansão de projetos com elevadas necessidades hídricas em locais com escassez hídrica, diminuição das emissões de gases com efeito estufa e diminuição da disposição de efluentes em recursos hídricos, entre outros, para determinar a opção mais viável do ponto de vista social, ambiental e económico.

Uma análise econômica integrada dos custos associados e dos benefícios derivados do tratamento de efluente é um pré-requisito para assegurar a sustentabilidade econômica, social e ambiental do reuso a longo prazo. Enquanto os custos do tratamento sejam altamente dependentes da qualidade do afluente (água residual bruta) e da capacidade da ETAR, os benefícios são relativamente estáveis (Arborea *et al.*, 2017).

A abordagem comum para avaliar a viabilidade econômica das ETAR's para reutilização é a análise custo-benefício, que compara todos os custos incorridos e os benefícios alcançados com a reutilização de águas residuais reutilizadas. No entanto, no caso de ETAR's para reutilização, as estimativas econômicas não são diretas. Embora possa haver algumas questões específicas do contexto, uma das dificuldades está em precisar os momentos, no futuro, em que os custos e benefícios

ocorrem e seus valores. Quanto ao tempo, a natureza de curto prazo da incidência de investimentos diverge da natureza de longo prazo da obtenção de benefícios, particularmente em termos de meio ambiente. Nesse sentido, o valor definido para a taxa de desconto (ou de atualização) pode fazer a diferença (Giannoccaro *et al.*, 2019).

A análise custo-benefício parte da premissa de que um investimento só deve ser feito se os benefícios excederem os custos agregados. Consequentemente, os custos e benefícios de cada proposta são comparados usando uma estrutura analítica comum.

O local onde os custos são avaliados é uma das variáveis mais importantes, porque é a economia do local quem vai ditar o valor a ser cobrado pela água, é quem vai ditar as distâncias a serem percorridas pela água, as necessidades de armazenamento e bombeamento e os padrões de qualidade requeridos (Arborea *et al.*, 2017).

Uma comparação custo-benefício deve levar em consideração o efeito de escala da ETAR. O equivalente populacional (PE) é uma unidade aplicada às águas residuais para descrever a carga afluente. O custo médio por m^3 de águas residuais recuperadas diminui à medida que o PE aumenta. O ponto de equilíbrio é onde os custos são iguais aos benefícios. Esse ponto é usado como o limiar de PE a partir do qual um determinado investimento na ETAR para efeitos de reutilização começa a se tornar economicamente viável (Arborea *et al.*, 2017).

Em relação aos custos e desafios relacionados com as opções para atenuação dos efeitos da escassez hídrica, Mancuso *et al.*, (2021) apresentam uma avaliação das principais possibilidades, conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Avaliação das principais possibilidades de atenuação da escassez hídrica em termos de custo final da água e desafios e restrições

Opção disponível	Custo da água (US\$/m ³)	Desafios e Restrições
Dessalinização da água do mar	1,22-1,90	Potenciais impactos ambientais associados à estrutura de captação e lançamento do concentrado. Consumo de energia relativamente alto. Disponível apenas em regiões costeiras. Susceptibilidade a problemas de proliferação de algas, maré vermelha e maior complexidade para licenciamento.
Dessalinização de água salobra	0,75-1,05	Disponível apenas em regiões com aquíferos subterrâneos de água salobra. Problemas relacionados à disposição final do concentrado gerado.
Transposição de bacias	070-1,05	Disponibilidade incerta e variável com a possibilidade de interrupção em função das condições climáticas e litígios. Os custos têm se tornado elevados. Uso intensivo de energia para bombeamento. Impactos ambientais adversos.
Reutilização potável direta	0,66-1,62	Exige monitoramento adicional e barreiras adicionais de tratamento. O uso de reservatórios de controle para assegurar um tempo necessário para o monitoramento e controle da qualidade da água.
Reutilização potável indireta	0,66-1,62	Indisponibilidade de um reservatório ou aquífero para direcionamento da água produzida. Risco de contaminação da água ou uso para outra finalidade. Custo da estrutura adicional de transporte da água até o manancial. Gasto adicional com o tratamento na estação de produção de água potável.
Reutilização não potável	0,25-1,60	Custo para implantação da infraestrutura de distribuição. Demandas sazonais podem resultar na necessidade de armazenamento ou redução da capacidade de produção.
Uso eficiente da água e restrição de uso	0,38-0,79	Ao longo do tempo tornam-se menos efetivos para obtenção de economia de água a um custo competitivo. As restrições de uso podem impactar de forma negativa o desenvolvimento de diversas atividades no local. A redução do consumo pode impactar a estrutura de coleta de esgotos.

Fonte: Adaptada de Mancuso *et al.*, (2021)

5. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PESOS DOS INDICADORES E PARÂMETROS DO MODELO DE APOIO À DECISÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para determinação dos pesos dos indicadores e parâmetros relacionados com o modelo de apoio à decisão de reutilização de água, identificados no capítulo 4. O estudo realizado foi do tipo analítico-descritivo e de investigação operacional para apoio à decisão.

As pesquisas descritivas caracterizam-se frequentemente como estudos que procuram determinar status, opiniões ou projeções futuras nas respostas obtidas. A sua valorização está baseada na premissa que os problemas podem ser resolvidos e as práticas podem ser melhoradas através de descrição e análise de observações objetivas e diretas. A investigação operacional, por sua vez, é um ramo da matemática aplicada que faz uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos na ajuda à tomada de decisão. É usada sobretudo para analisar sistemas complexos do mundo real, tipicamente com o objetivo de melhorar ou otimizar o desempenho (Corrêa, 1996; Dias, 2015).

A investigação operacional tradicional, com a sua objetividade e racionalidade econômica, acabou sendo restringida a problemas pouco relevantes do ponto de vista social, embora importantes do ponto de vista técnico. Os estudos descritivos, contudo, tem mostrado que, na prática, os decisores violam com frequência as regras da racionalidade. A partir daí surgiu a Investigação Operacional Soft, que encara a tomada de decisão como um processo social, em que os decisores necessariamente interpretam e compreendem a realidade de forma diferente (Corrêa, 1996). Em processos sociais, tal como a tomada de decisão, é necessário levar em conta os valores, objetivos, aspirações e interesses dos indivíduos que tem que decidir (Dias, 2015) e, para isso, deve haver ferramentas para auxiliar os decisores a definir o seu problema. Uma dessas ferramentas são os métodos multicritérios de apoio à decisão, que se baseiam em um enfoque construtivista (Matzenauer, 2003).

Este capítulo apresenta o método multicritério utilizado no desenvolvimento do modelo de apoio à decisão pela reutilização de água e as etapas seguidas para determinação dos pesos dos seus indicadores e parâmetros.

5.2 MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

A decisão baseada em um modelo multicritério é um ramo da Investigação Operacional que lida com problemas com vários critérios, todos eles importantes para a tomada de decisão. A tomada de decisão envolve a subjetividade dos agentes envolvidos, os seus valores e a sua forma de agir, o que torna o processo de decisão mais complexo. Os agentes podem ser os diferentes stakeholders, cujos objetivos individuais podem ser conflitantes, sendo então necessário alcançar um compromisso entre as suas expectativas.

Nesse processo, há também os agentes intervenientes (os decisores), que validam as deliberações ao longo do processo, e os facilitadores (também chamados de consultores externos ou especialistas) que, de forma isolada ou em equipe, trabalha como colaborador de quem decide, gerando consenso entre os intervenientes, além de tornar o modelo claro, para que se possa com isto obter elementos de respostas, esclarecer o decisior sobre as consequências dos diferentes comportamentos que possam vir a ser assumidos por ele, e eventualmente recomendar uma ou uma série de ações ou ainda uma metodologia (Corrêa, 1996). São os facilitadores que modelam o processo de avaliação da tomada de decisão.

Assim, o principal objetivo dos modelos de apoio à decisão multicritério é auxiliar na escolha da solução que melhor satisfaça globalmente os diversos critérios. De forma geral, não existe uma solução ótima, porque normalmente os critérios são conflituosos, mas sim uma solução que sirva as necessidades do agente de decisão e seja coerente com as suas preferências (Dias, 2015).

Os métodos multicritérios desenvolveram-se, basicamente, sob os preceitos de duas Escolas: a Escola Americana, que desenvolve métodos multicritérios de Tomada de Decisão, denominados MCDM (Multicriteria Decision Making), e caracteriza-se por adotar o paradigma científico do racionalismo, e a Escola Europeia, que desenvolve métodos multicritérios de Apoio à Decisão, denominados MCDA (Multicriteria Decision Aid), que se caracterizam-se por adotar o paradigma científico do construtivismo (Matzenauer, 2003).

Segundo Matzenauer (2003) é importante definir o paradigma científico que será adotado no desenvolvimento de um modelo para que, à medida que forem surgindo críticas ao modelo estabelecido, sejam explicitados os preceitos do paradigma adotado e os objetivos que se propõem. Para esse autor, a escolha de um

determinado paradigma deve-se, exclusivamente, aos valores dos pesquisadores ou consultores que o adotam, sendo assim impossível determinar qual deles é o melhor.

O paradigma racionalista da Escola Americana, que desenvolve Métodos Multicritério de Tomada de Decisão (MCDM), caracteriza-se por ter uma visão objetivista do problema, partindo do pressuposto de que é possível observar a realidade (eventos) com imparcialidade total. Na visão objetivista, predominante na investigação operacional tradicional, o conhecimento é originado, fundamentalmente, a partir do objeto e a realidade é externa e independente do sujeito, com todos os grupos envolvidos na tomada de decisão observando a realidade (contexto decisório) de forma idêntica. Devido a esta forma de encarar os problemas, os pesquisadores da linha racionalista passaram a desprezar os aspectos qualitativos em suas análises e a desconsiderar opiniões dos grupos envolvidos nas decisões (Lima *et al.*, 2004; Matzenauer, 2003).

Já o paradigma construtivista da Escola Europeia, que desenvolve Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA), caracteriza-se por ter uma visão construtivista do problema, ou seja, o conhecimento é originado a partir de uma interação entre o objeto e o sujeito. A existência de uma realidade externa é enfatizada, mas ao contrário da visão objetivista, em que a realidade independe do sujeito, nesta visão o sujeito tem um papel ativo na produção do conhecimento, uma vez que essa realidade é percebida por ele e é com referência a essa realidade que o sujeito é visto como estando engajado em uma interação constante e na necessidade de adaptação (Corrêa, 1996; Matzenauer, 2003). No paradigma construtivista, os interesses, valores e objetivos dos diversos grupos envolvidos em um processo decisório devem ser levados em conta (Dias, 2015).

Como no paradigma construtivista os problemas são construídos a partir de uma percepção subjetiva da realidade, torna-se impossível generalizar um modelo utilizado anteriormente em novos problemas construídos que aparecerão no futuro. Cada situação decisória é única e não pode ser reproduzida, porque diferentes indivíduos terão diferentes objetivos, valores, interesses e aspirações. Além disso, a decisão é tomada em um dado local e em um dado momento no tempo e os valores dos envolvidos na decisão alteram-se ao longo do tempo e serão diferentes em outro local (Matzenauer, 2003).

Esse pressuposto, de que a tomada de decisão é um evento único, por ser um processo social, faz com que a ênfase seja alterada em direção a modelos e

soluções que atendam ao contexto local, em vez de buscar verdades generalizáveis. O modelo tem a intenção de fornecer apoio à decisão para aqueles decisores cujo modelo foi construído, em um determinado momento no tempo e para aquela decisão específica. Assim sendo, os métodos construtivistas são uma ferramenta que visam não somente avaliar e, eventualmente, escolher uma alternativa, mas principalmente que propiciam: criar novas (e melhores) alternativas; identificar oportunidades de decisão; guiar o pensamento estratégico; interconectar decisões; guiar o processo de obtenção de informações; facilitar o envolvimento dos múltiplos grupos de influência; melhorar a comunicação e permitir ao tomador de decisão refletir sobre seus valores e objetivos (Lima *et al.*, 2004; Matzenauer, 2003).

No paradigma construtivista, tanto o resultado da análise quanto o processo de construção do modelo são fundamentais. Assim, diferentes processos levarão a diferentes modelos e, consequentemente, a diferentes resultados. Desta forma, o processo influenciará na avaliação das alternativas (Matzenauer, 2003).

Para Matzenauer (2003), como um modelo de apoio à decisão não retrata a “verdade”, nem o pretende, suas conclusões devem ser encaradas com mais cuidado do que um modelo baseado no paradigma racionalista. Desta forma, é melhor falar em uma recomendação, do que propriamente em uma proposta fixa, já que a solução encontrada pelo modelo não é a única possível, mas apenas uma especialmente bem fundamentada. As recomendações podem ser desenvolvidas sem buscar a aproximação de qualquer verdade externa ou solução ótima, sendo o seu conteúdo resultado do processo de construção de convicções do decisor e pesquisador, sobre quais são as melhores direções a seguir. No apoio à decisão não se busca a melhor decisão, mas sim desenvolver um conjunto de condições e meios que sirvam de base para as decisões, em função daquilo que o decisor acredita ser o mais adequado, dentro de um determinado contexto (Dias, 2015; Lima *et al.*, 2004).

Considerando que neste trabalho um dos aspectos influenciadores na decisão de reutilização de água é o aspecto social, adotou-se o paradigma construtivista. Assim, utilizou-se um método multicritério MCDA (Multicriteria Decision Aid) com o objetivo de hierarquizar os indicadores e parâmetros com influência na decisão de reutilização.

Nos últimos anos, os métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA) têm se destacado como ferramentas fundamentais na gestão integrada de recursos hídricos, especialmente no contexto da reutilização de água residual tratada. Diante

da crescente escassez hídrica e da necessidade de soluções sustentáveis para o reuso de efluentes, pesquisadores vêm empregando abordagens multicritério para avaliar e priorizar alternativas considerando critérios ambientais, econômicos, técnicos e sociais. Segundo Zhang *et al.* (2020), a complexidade envolvida na escolha de tecnologias de tratamento, rotas de reuso e estratégias de implementação exige métodos capazes de incorporar múltiplas perspectivas e lidar com a subjetividade dos tomadores de decisão. Técnicas como AHP (Analytic Hierarchy Process), TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) e o método fuzzy AHP vêm sendo amplamente aplicadas nesse domínio, demonstrando eficácia na estruturação de problemas e na análise de trade-offs entre critérios conflitantes.

Estudos recentes reforçam a aplicabilidade dos métodos MCDA na avaliação de cenários de reuso de água, como demonstrado por Safari *et al.* (2020), que aplicaram métodos MCDM para selecionar sistemas de tratamento de esgoto mais adequados ao reúso agrícola, considerando aspectos como custo, eficiência de remoção de contaminantes e aceitação social. Além disso, Sharma *et al.* (2023) fizeram uma revisão da utilização de métodos MCDM para a escolha de tecnologias de tratamento de água residual tratada.

Um processo de MCDA começa com a determinação dos objetivos, que devem ser os mais claros possíveis para facilitar as fases subsequentes. A análise MCDA realizada nesta tese iniciou-se com a identificação dos critérios e subcritérios (também denominada de indicadores e parâmetros, respectivamente) a utilizar, e continuou com a respectiva estimativa, de modo a permitir a avaliação das alternativas, quais sejam: reutilizar ou não reutilizar a água residual tratada de uma Estação de Tratamento de Água Residual (ETAR).

Após identificado os indicadores e parâmetros relevantes para uma decisão de reutilização de água, há ainda que quantificar a importância relativa de cada um destes indicadores e parâmetros. Esta quantificação foi realizada recorrendo a ponderações, que são cruciais para a obtenção do modelo de apoio à decisão, como o AHP (Analytic Hierarchy Process).

O método AHP, introduzido por Thomas Saaty em 1980, é um dos métodos mais eficientes para apoio à decisão. O método AHP tradicional, contudo, não consegue refletir a incerteza do pensamento humano. Como resultado, o método fuzzy AHP (FAHP) foi desenvolvido para solucionar problemas de incerteza hierárquica. O método FAHP, utilizado na presente tese, é uma abordagem

sistemática de problemas de apoio à decisão que usa conceitos da teoria dos conjuntos difusos e análise da estrutura hierárquica (Nguyen & Tran, 2018; Saaty, 1980).

A teoria dos conjuntos *fuzzy* e da lógica *fuzzy* permite capturar o fenômeno natural da imprecisão e incerteza do pensamento humano, expandindo a lógica tradicional ao incluir instâncias da verdade parcial, podendo ser utilizada para lidar com problemas difusos e incertos no mundo real (Oliveira, 2023).

Na teoria clássica dos conjuntos, um elemento ou pertence, ou não pertence a um conjunto. Já nos conjuntos *fuzzy*, um elemento pode pertencer a um conjunto com diferentes graus de pertinência, variando entre 0 e 1.

Tabela 5.1 – Diferenças entre os conjuntos clássicos e os conjuntos *fuzzy*

CARACTERÍSTICA	CONJUNTOS CLÁSSICOS	CONJUNTOS FUZZY
Pertinência	0 ou 1	Entre 0 e 1
Tipo de Lógica	Binária	Multivalorada
Lida com incerteza?	Não	Sim
Exemplo	“Está quente” ou não	“Está meio quente”

Imagine um termostato programado com lógica clássica. Se a temperatura for maior que 25 °C, ligar o ventilador. Se for 25 °C ou menos, desligar. Resultado: se a temperatura oscilar entre 25 °C e 25,1 °C, o sistema liga e desliga o tempo todo, gerando instabilidade.

Com a lógica *fuzzy*, o comportamento muda gradualmente:

- Em 24 °C, o ventilador gira bem devagar.
- Em 26 °C, já acelera mais.
- Em 30 °C, atinge quase o máximo.

Ou seja, com a lógica *fuzzy* as decisões são mais humanas, adaptativas e estáveis, exatamente o que é necessário em ambientes onde há incerteza, subjetividade ou dados imprecisos (como clima, opinião pública, diagnósticos médicos, avaliação de risco etc.).

Assim, na presente tese foi utilizado o método multicritério *Fuzzy AHP* para determinar os pesos dos indicadores e parâmetros identificados como relevantes para uma decisão de reutilização de água residual tratada, construindo, em seguida, um modelo matemático de apoio à decisão que permite avaliar, logo na fase inicial do projeto, a sua viabilidade.

Uma vez que a literatura pesquisada mostrou que os estudos relacionados com os métodos MCDA e recursos hídricos referem-se, na sua maioria, à escolha de alternativas de tecnologias de tratamento ou de área para implantação de reutilização de água, o presente trabalho apresenta-se como uma ferramenta inovadora por apresentar um modelo, aplicável em qualquer local, cuja finalidade é ajudar a decidir pela implantação ou não de um projeto de reutilização de água em uma cidade.

5.3 DETERMINAÇÃO DOS PESOS DOS INDICADORES E PARÂMETROS

Os pesos foram estabelecidos com a utilização do método *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP), de acordo com a metodologia utilizada por Nguyen e Tran (2018). Utilizando o método FAHP, oito etapas foram desenvolvidas, conforme se segue.

5.3.1 Etapa 1: Desenvolvimento da estrutura hierárquica

Na etapa 1, a estrutura hierárquica foi desenvolvida a partir dos 4 indicadores (critérios) e 12 parâmetros (subcritérios) identificados no capítulo 4, conforme Figura 5.1. Os parâmetros (nessa tese chamados de subcritérios) foram agrupados sob 4 indicadores principais (nessa tese chamados de critérios), denominados C_i : técnico (C_1), social (C_2), ambiental (C_3) e econômico (C_4). Os subcritérios foram identificados como C_{ij} .

Depois de estabelecer a estrutura hierárquica com 4 critérios e 12 subcritérios, o método FAHP pode ser utilizado para determinar a importância relativa dos critérios e subcritérios e assim ajudar na tomada de decisão.

No critério técnico (C_1), foram identificados três subcritérios: complexidade do transporte (C_{11}), relacionada a existência ou não de infraestrutura para o transporte e armazenamento da água residual tratada e a distância entre a ETAR e a área de

utilização; segurança e resiliência da solução de tratamento (C₁₂), relacionada com a fiabilidade da ETAR, isto é, se a água produzida atende ao padrão requerido no normativo legal, caso exista; e existência de legislação (C₁₃), relacionada com a existência e abrangência de uma legislação que trate do padrão requerido para as finalidades de reutilização de água residual tratada.

Em relação ao indicador social (C₂), o parâmetro Grau de Aceitação (C₂₁) está relacionado com a aceitação da população envolvida em reutilizar água residual tratada, em consumir produtos e/ou frequentar parques irrigados com essa água. Já o parâmetro Grau de Necessidade (C₂₂) está relacionado com a crise hídrica, se o local onde se pretende implantar a reutilização de água residual tratada sofre ou não com escassez hídrica. O parâmetro Percentual de Coleta e Tratamento de Esgoto (C₂₃) é o percentual de cobertura de rede coletora e tratamento de esgoto da zona servida pela ETAR.

Quanto ao indicador ambiental (C₃), o parâmetro risco para saúde pública (C₃₁) está relacionado com os riscos de contaminação humana pelo uso de água residual tratada. O parâmetro Consumo de energia pela ETAR (C₃₂) está relacionado com a energia utilizada pela ETAR, nomeadamente em face do impacto ambiental da fonte energética utilizada (emissões de gases de efeito estufa) e seus custos oriundos. O parâmetro Risco para o ambiente (C₃₃) está relacionado com os riscos de contaminação do meio ambiente (solo e águas subterrâneas e superficiais) pelo uso de água residual tratada ou pela sua descarga em corpo receptor.

Quanto ao indicador econômico (C₄), o parâmetro Investimento Necessário (C₄₁) está relacionado com os investimentos necessários para implantação da reutilização (instalação e/ou adequação da ETAR, existência ou não de infraestrutura de transporte e armazenamento). O parâmetro Encargos de Operação e Manutenção (C₄₂) está relacionado com os custos para operar e manter a ETAR e a infraestrutura de transporte e armazenamento em funcionamento adequado. O parâmetro Benefícios Econômicos (C₄₃) está relacionado com os benefícios econômicos advindos da reutilização da água residual tratada como, por exemplo, o aumento da produtividade agrícola e redução do consumo de água de melhor qualidade para esse efeito.

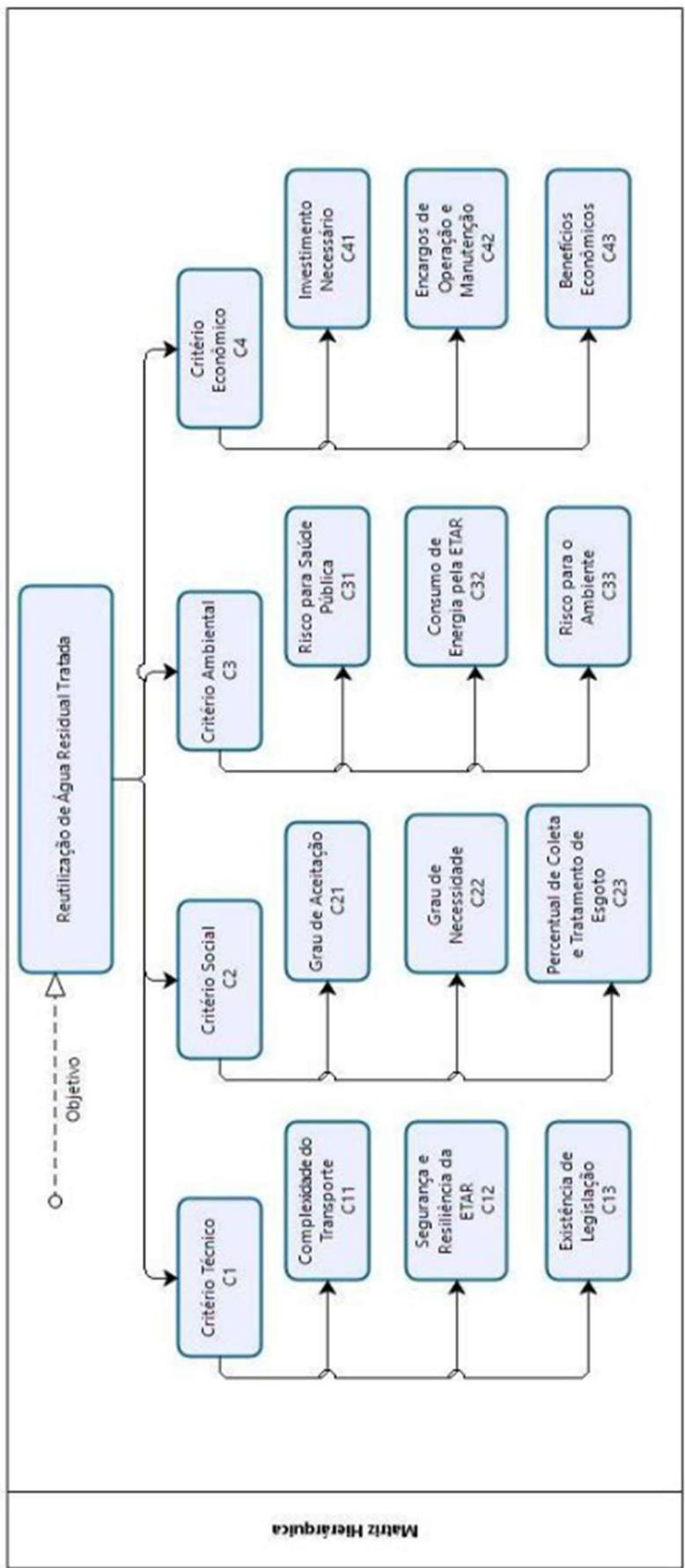


Figura 5.1 – Estrutura Hierárquica dos Indicadores e Parâmetros relacionados com a decisão de Reutilização de Água

5.3.2 Etapa 2: Obtenção dos julgamentos dos especialistas

Depois de construir a hierarquia, procedeu-se à comparação, par a par, entre os indicadores e entre os parâmetros de cada indicador. Nesta fase, utiliza-se a experiência, intuição e conhecimento específico sobre o problema para efetuar os julgamentos, principalmente em se tratando de critérios qualitativos (Gomes, 2009; Safari *et al.*, 2020).

No AHP, há várias maneiras para quantificar o valor das alternativas. Caso haja uma função analítica (ou de valor), basta calcular o valor desta função para cada alternativa. Caso contrário, pode-se utilizar a valoração direta das alternativas, que consiste em ordená-las segundo a preferência do decisor, emitida em forma de juízo verbal que é, então, convertido em valor numérico por meio da Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty (Safari *et al.*, 2020).

As preferências do decisor são organizadas em uma matriz de decisão quadrada (recíproca e positiva) $n \times n$, usualmente denominada matriz de comparações par a par ou matriz dominante. Os elementos dessa matriz, contendo os valores oriundos das comparações par a par, expressam o número de vezes em que uma alternativa domina ou é dominada pelas demais. Cada elemento a_{ij} do vetor linha da matriz dominante representa a dominância da alternativa A_i (da linha) sobre a alternativa A_j (da coluna) (Gomes, 2009).

A diagonal principal da matriz de decisão é preenchida com um valor estipulado para representar a não dominância de uma alternativa sobre a outra (na Escala Fundamental de Saaty corresponde ao valor 1). Se o elemento A_i for mais importante do que o elemento A_j , é inserido um valor entre 2 e 9. Caso contrário, ou seja, se A_i for menos importante do que A_j , é inserido um número inverso dos valores 2 a 9, ou seja, $1/2, 1/3$ e assim por diante. Nas matrizes quadradas, tem-se a_{ij} , para $i = 1, 2, \dots, n$ e $j = 1, 2, \dots, n$. Tais matrizes são também denominadas recíprocas e positivas ($a_{ij} = 1/a_{ji}$) (Gomes, 2009).

As comparações par a par correlacionam o grau de preferência de um indicador/parâmetro (dominância) sobre outro, segundo um determinado critério. Essa preferência é expressa em uma escala numérica, oriunda da relação entre reações humanas e estímulos, baseada em estudos inicialmente desenvolvidos por Weber (1846) e Fachner (1860) (Oliveira, 2023).

Segundo Gomes (2009), os indivíduos são capazes de dividir qualitativamente suas respostas a um estímulo em três grandes categorias: alta, média e baixa, refinando essas divisões novamente em: alta, média e baixa, gerando nove subdivisões (Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty ou Escala *fuzzy* de nove pontos).

As comparações são usadas para expressar o grau de preferência – elucidado pelo decisor semanticamente – de um indicador/parâmetro sobre outro levando em consideração um determinado critério, correlacionando os julgamentos em uma escala numérica de 1 a 9 (Escala de Razão), da qual deriva-se o autovetor principal de prioridades. Ao invés de o decisor avaliar a razão entre dois números w_i/w_j , apenas um número absoluto (de 1 a 9) é extraído da Escala Fundamental para representar a maior aproximação inteira do quociente w_i/w_j , conforme Tabela 5.2 (Gomes, 2009; Oliveira, 2023; Safari, 2020).

Tabela 5.2 – Escala *fuzzy* de nove pontos

AVALIAÇÃO	PESO
Extremamente mais importante	9
Muito mais importante	7
Mais importante	5
Levemente mais importante	3
Valores intermediários entre os valores adjacentes	2, 4, 6, 8
Igualmente importante	1

O autovetor mostra a dominância de cada elemento com respeito aos outros para um dado critério, sendo que um elemento que não está sujeito a um critério recebe o valor zero no autovetor, não sendo computado em comparações (Gomes, 2009; Oliveira 2023).

Nessa etapa foi enviado para especialistas da área um formulário google forms contendo as matrizes para comparação. Somente 5 especialistas responderam o formulário. A Tabela 5.3 apresenta um modelo de uma das matrizes do formulário para julgamento da comparação dos parâmetros do indicador técnico.

Tabela 5.3 – Matriz de julgamento dos parâmetros do indicador técnico

	EMI+	MMI+	MI+	LMI+	II	LMI-	MI-	MMI-	EMI-
C_{11}/C_{12}									
C_{11}/C_{13}									
C_{12}/C_{13}									

Os elementos da primeira coluna da Tabela 5.3 são os pares de parâmetros cuja comparação deve ser feita, julgando a importância de um em relação ao outro. Na primeira linha, por exemplo, a pergunta que deve ser respondida é: quão importante é o parâmetro C_{11} quando comparado com o parâmetro C_{12} . É importante observar que a comparação deve ser feita exatamente nesta ordem, ou seja, avaliando o parâmetro C_{11} em relação ao parâmetro C_{12} , e não o contrário. Será escolhida uma entre as cinco opções de importância, a critério da percepção do especialista. A identificação dos indicadores e parâmetros consta na Figura 5.1.

Quanto às opções de importância, elas são: extremamente mais importante (EMI+), muito mais importante (MMI+), mais importante (MI+), levemente mais importante (LMI+), igualmente Importante (II), levemente menos importante (LMI-), menos importante (MI-), muito menos Importante (MMI-) e extremamente menos Importante (EMI-).

Após recebido o formulário respondido, as avaliações qualitativas foram transformadas numa matriz numérica, considerando as correspondências da Tabela 5.2, tendo sido construída uma matriz para cada julgador (especialista).

5.3.3 Etapa 3: Conversão dos julgamentos dos especialistas em números triangulares fuzzy

A etapa 3 consistiu na conversão dos julgamentos realizados na Etapa 2 em números triangulares fuzzy. Como os julgamentos são subjetivos, linguísticos e incertos, eles foram convertidos de uma escala fuzzy de nove pontos para números triangulares fuzzy (l, m, u), com um fator de fuzificação (Δ) igual a 1, conforme o seguinte:

- (1, 1, 1) se a complexidade relativa foi julgada como 1
- ($x-\Delta$, x , $x+\Delta$) se a complexidade relativa foi julgada com x ($x = 2, 3, \dots, 8$)
- (8, 9, 9) se a complexidade relativa foi julgada como 9
- ($1/(x+\Delta)$, x , $1/(x-\Delta)$) se a complexidade relativa foi julgada como $1/x$

(1/9, 1/9, 1/8) se a complexidade relativa foi julgada como 1/9

5.3.4 Etapa 4: Agregação dos julgamentos dos especialistas em uma matriz de julgamento fuzzy

A etapa 4 consistiu na construção das matrizes de julgamento *fuzzy* para cada comparação, de cada especialista, a partir das equações 5.1, 5.2 e 5.3, onde (l_{ijk} , m_{ijk} , u_{ijk}) é a comparação, par a par, entre o critério (ou subcritério) i e j avaliado pelo k º julgador na etapa 3 e K é o número de julgadores.

$\bar{J}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$, tais que $l_{ij} \leq m_{ij} \leq u_{ij}$ e $l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} \in [1/9, 9]$

$$l_{ij} = \min (l_{ijk}) \quad (5.1)$$

$$m_{ij} = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K m_{ijk}} \quad (5.2)$$

$$u_{ij} = \max (u_{ijk}) \quad (5.3)$$

Onde, l_i indica o valor mínimo da classificação de todos os especialistas; m_i é a média geométrica da ponderação feita pelos especialistas em relação ao critério i (valor modal); e u_i indica a pontuação máxima atribuída pelos especialistas. Na presente tese, a avaliação foi realizada por cinco especialistas.

Cabe ressaltar que $(l_{ji}, m_{ji}, u_{ji}) = (1/u_{ij}, 1/m_{ij}, 1/l_{ij})$.

5.3.5 Etapa 5: Verificação da consistência

A verificação da consistência é necessária para verificar se os julgamentos foram aleatórios, situação em que a matriz tem um alto grau de inconsistência, ou baseados em conhecimento científico do julgador (Gomes, 2009).

A verificação de consistência dos valores de julgamentos coletados é conduzida nos mesmos termos adotados no método AHP tradicional, segundo o qual julgamentos consistentes devem satisfazer à condição $RC < 0,1$. RC é a razão de consistência e é calculada por meio da equação 5.4 (Saaty, 1980).

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{\lambda_{\max} - n}{IR(n-1)} \quad (5.4)$$

Onde, RC é a razão de consistências, IC = Índice de Consistência; n = nº de critérios da matriz e tem que ser menor do que o autovalor; λ_{\max} é o autovalor principal da matriz de julgamentos; e IR = índice randômico baseado no tamanho da matriz n , conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Índice médio de consistência randômica. Fonte: (Gomes, 2009)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

No que se refere ao autovalor, sabe-se que as matrizes de comparação são manipuladas para obtenção das prioridades relativas de cada um dos critérios. As prioridades deverão ser números entre 0 e 1, e sua soma deve totalizar 1. A compreensão fundamental desta etapa considera que, se o analista soubesse os pesos relativos de cada um dos critérios de uma matriz de n elementos, então a matriz de comparação dos pares deveria ser equivalente a A , em que:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix}$$

w_i corresponde ao peso relativo do critério i . Nesse caso, os pesos relativos podem ser facilmente obtidos de qualquer uma das n linhas de A porque $Aw = nw$, para $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$. Em álgebra linear, n e w são chamados respectivamente de autovalor e autovetor direito da matriz A . O AHP considera que o analista de decisão que constrói a matriz de comparação entre os pares não conhece w . Como a matriz A contém inconsistências, é necessário determinar uma medida de consistência aceitável para o método.

Para uma compreensão do método do autovetor, é necessária uma abordagem conceitual sobre um dos pilares do método AHP – Escala de razão, proporcionalidade e escalas normalizadas.

Uma razão é um valor relativo ou quociente a/b de duas quantidades a e b do mesmo tipo. É chamada mensurável se é um número racional, caso contrário é denominada incomensurável. Já a proporcionalidade é a condição de igualdade entre duas razões a/b e c/d (Gomes, 2009).

Uma escala de razão é um conjunto de números que é invariável sob transformação de similaridade (multiplicação por uma constante positiva). A constante é cancelada quando a razão de quaisquer dois números é formada. Por exemplo, duas medidas de peso podem ser usadas, mas a razão de peso de dois objetos torna-se igual quando lidas em ambas as escalas (Gomes, 2009).

Uma extensão deste fato é a de que os pesos (por exemplo em kilogramas) de uma série de objetos (independente da medida utilizada) podem ser padronizados para uma mesma leitura por meio de normalização, ou seja, quando lidos numa mesma escala de razão padronizada.

As escalas de razão, proporcionalidade e escalas de razão normalizadas são essenciais para a geração e síntese de prioridades no AHP ou em qualquer outro método multicritério que necessite integrar medidas de comparação na sua própria escala. Adicionalmente, escalas de razão são a única maneira de generalizar uma teoria de decisão para o caso de dependência e *feedback*, porque elas podem ser somadas e multiplicadas quando pertencem à mesma escala, como uma escala de prioridades (Gomes, 2009).

No AHP, a escala de razão relativa deriva da matriz de julgamentos recíproca da comparação das alternativas, duas a duas (par a par), sendo resultado do seguinte sistema:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = \lambda_{\max} w_i \quad (5.5)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (5.6)$$

Onde:

$a_{ji} = 1/a_{ij}$ ou $a_{ij}a_{ji} = 1$ (propriedade recíproca), $a_{ij} > 0$ (A é matriz positiva);

w_i : autovetor;

λ_{\max} : autovalor; e

A : matriz de julgamentos $n \times n$ de i linhas e j colunas, com i e $j = 1, 2, \dots, n$.

Quando $a_{ij} a_{jk} = a_{ik}$, a matriz $A = (a_{ij})$ é denominada consistente, e o seu autovalor principal é igual a n . Caso contrário, a matriz é apenas recíproca.

Para compreensão da notação utilizada, há vários métodos que visam o cálculo exato das prioridades de um problema, entre os quais: o método dos mínimos quadrados (LSM), o método dos mínimos quadrados logarítmico (logarithmic LSM) e o método do autovetor. Segundo Gomes (2009) o método do autovetor parece ser o único a tratar corretamente matrizes que não sejam consistentes.

Saaty (2003), citado por Gomes (2009), afirma que a solução pelo método do autovetor dá-se a partir da estimativa do vetor x da matriz, que é o vetor de prioridades, o qual deve satisfazer a relação $Ax = cx$, com c constante e $c > 0$. Para satisfazer tal relação, o vetor deve ser um múltiplo positivo do autovetor principal de A , e c deve ser o autovalor máximo de A .

Teoricamente, a representação $Ax = cx$ significa que as matrizes são quase consistentes. Por uma matriz quase consistente, entende-se uma matriz $A = (a_{ij})$ que é uma pequena perturbação multiplicada de uma matriz consistente $W = (w/w_j)$, e tem um autovetor x , que é uma pequena perturbação do autovetor w da matriz consistente.

Matrizes que apresentam alto grau de inconsistência, refletem julgamentos aleatórios, por isso devem ser refeitos ou passar por métodos de melhoria de consistência (Gomes, 2009).

A relação entre as matrizes obedece ao produto de Hadamard $A = W \cdot E$, onde a perturbação $E = (\varepsilon_{ij})$ afeta cada termo da matriz multiplicando-se a ele ($a_{ij} \varepsilon_{ij}$). É verdade que $\varepsilon_{ji} = \varepsilon_{ij} - 1$ e, quando não há perturbação, $\varepsilon_{ij} = 1$ (Gomes, 2009).

O produto de Hadamard entre duas matrizes, necessariamente de mesma dimensão, é a multiplicação direta entre os termos da mesma posição, então:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x & y \\ z & w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ax & by \\ cz & dw \end{pmatrix}$$

A relação $Ax = cx$ é frequentemente representada na literatura por $Aw = \lambda_{\max} w$, onde $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ é o autovetor principal de A e λ_{\max} é o autovalor máximo correspondente, cuja solução denomina-se autovetor principal direito. Na

matriz quase consistente, o somatório em j das perturbações ε_{ij} de seus elementos em relação aos da matriz absolutamente consistente equivalem a λ_{\max} :

$$\sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} = \lambda_{\max}, \quad \epsilon \geq 1 \quad (5.7)$$

Dito de outra forma, quando a matriz tiver uma consistência aceitável, ou seja, representar uma perturbação relativamente pequena, a soma de todos os ε_{ij} de uma linha qualquer é igual ao valor de λ_{\max} .

Saaty (2003), citado por Gomes (2009) afirma que $\lambda_{\max} \geq n$. Somente quando a matriz for consistente, ter-se-á todos os $\varepsilon_{ij} = 1$, e nesse caso λ_{\max} se iguala a n (a ordem da matriz). O desvio de λ_{\max} em relação a n é então o que possibilita calcular a razão de inconsistência dos julgamentos.

Resumidamente, de acordo com Tesfamariam e Sadiq (2006), a razão de consistência (RC) pode ser avaliada pelo valor modal m . Assim, a matriz construída para verificação da consistência é formada com os valores modais das matrizes da etapa 4.

O autovetor é calculado como o quociente entre a soma da linha da matriz pela soma total. Na sequência, calcula-se o produto vetorial (Aw) a partir da multiplicação de cada linha da matriz pelo autovetor. O termo λ é calculado pelo quociente entre o produto vetorial e o autovetor. O λ_{\max} é a média dos valores de λ .

5.3.6 Etapa 6: Defuzificação da matriz de julgamento

A etapa 6 consistiu na construção da matriz de defuzificação. O processo de defuzificação consiste na conversão dos números *fuzzy* na matriz de comparação par a par em números *crisp*.

A defuzificação é uma etapa fundamental no método *Fuzzy AHP* porque ela converte os números *fuzzy* triangulares — que representam julgamentos com incerteza — em valores únicos e precisos, ou seja, valores "crisp", que possam ser comparados e utilizados diretamente para tomada de decisão.

Os especialistas nem sempre conseguem dar uma opinião exata. Há incertezas, subjetividade e ambiguidade nos julgamentos humanos.

Para representar essa incerteza, os números *fuzzy* triangulares (ex: (1, 3, 5)) são usados:

- 1 representa o valor mínimo aceitável,
- 3 o valor mais provável (ou central),
- 5 o valor máximo aceitável.

Percebe-se, então, que os resultados em forma *fuzzy* não são práticos para a tomada de decisão final. Após calcular os pesos *fuzzy* dos critérios ou alternativas, ainda temos intervalos, não um número exato. Para ordenar os critérios, comparar pesos ou selecionar a melhor alternativa, precisamos de valores únicos. Por isso faz-se necessário defuzificar. A defuzificação reduz o número *fuzzy* a um valor escalar, preservando ao máximo o significado dos julgamentos originais.

A lógica *fuzzy* ajuda a capturar a imprecisão dos julgamentos humanos. Mas, no final, para decidir, você precisa de um número claro. Suponha que, após os cálculos *fuzzy*, o peso de um indicador seja dado como um número triangular *fuzzy* (0,2; 0,5; 0,8). Com a defuzificação (por exemplo, usando a média simples: $(0,2 + 0,5 + 0,8)/3$), o peso será 0,5 — um número claro para ser usado em rankings ou decisões.

A defuzificação, portanto, é necessária porque, embora a lógica *fuzzy* torne os julgamentos mais realistas ao lidar com incerteza, a decisão final exige precisão e comparabilidade. Ou seja: *fuzzy* para pensar melhor, *crisp* para agir melhor.

Na defuzificação são usados o grau de confiança (α -cut) e a aptidão pelo risco (λ) do tomador de decisão, ambos a variar entre 0 e 1. Um grande α -cut ou um grande λ evidencia mais confiança ou uma visão mais otimista do decisão, respectivamente. Na presente tese, o processo de defuzificação foi realizado com base nas equações 5.8, 5.9 e 5.10, utilizando um α -cut = 0,5 e $\lambda = 0,5$, conforme proposto por Nguyen e Tran (2018).

$$Z^{\alpha_{ijl}} = (m_{ij} - l_{ij})\alpha + l_{ij} \quad (5.8)$$

$$Z^{\alpha_{ijr}} = u_{ij} - (u_{ij} - m_{ij})\alpha \quad (5.9)$$

$$Z^{\lambda_{ij\alpha}} = \lambda Z^{\alpha_{ijr}} + (1 - \lambda)Z^{\alpha_{ijl}} \quad (5.10)$$

Onde m_{ij} , l_{ij} e u_{ij} são elementos das matrizes construídas na etapa 4. As equações 5.8 e 5.9 geram 2 matrizes, cujos elementos são calculados pelas respectivas equações. A matriz defuzificada é então formada pelos elementos calculados com a equação 5.10, que leva em consideração os elementos calculados com as equações 5.8 e 5.9.

5.3.7 Etapa 7: Determinação dos pesos locais

A etapa 7 consistiu na determinação dos pesos locais dos indicadores e parâmetros (critérios e subcritérios). Segundo Nguyen e Tran (2018), são usados vários métodos para obter os pesos locais (c_i) dos critérios e subcritérios. Um método simples é através da equação 5.11.

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{z_{ij}}{\sum_{k=1}^n z_{kj}} \quad (5.11)$$

Onde c_i é o peso local do indicador (critério) e do parâmetro (subcritério), Z_{ij} são elementos da linha da matriz defuzificada e $\sum Z_{kj}$ é o somatório dos valores de cada coluna da matriz defusificada.

5.3.8 Etapa 8: Determinação do peso global

Usando a equação 5.12, calcularam-se os pesos globais (w_{ij}) dos parâmetros (subcritérios).

$$W_{ij} = c_i \times c_{ij} \quad (5.12)$$

onde c_i é o peso local do indicador i e c_{ij} é o peso local do parâmetro j do indicador i .

5.4 MODELO DE APOIO À DECISÃO

Após encontrar o peso global dos parâmetros (subcritérios), que leva em consideração o peso local do indicador (critério) e o peso local dos correspondentes

parâmetros, é possível calcular o índice de viabilidade potencial de reutilização de água, a partir da equação 5.13, cuja classificação consta na Tabela 5.5.

$$IVR = [\sum (W_{ij} \times K_{ij})] \times 100 \quad (5.13)$$

Onde,

IVR = Índice de viabilidade potencial de reutilização de água

W_{ij} = Peso global do subcritério

K_{ij} = Constante de cada parâmetro (subcritério), de acordo com as tabelas 5.6 a 5.17, que se apresentam seguidamente

Tabela 5.5 – Índice de Viabilidade Potencial de Reutilização de Água (IVR)

	IVR (%)	CLASSIFICAÇÃO
ÍNDICE DE VIABILIDADE	81 -100	Muito Alta Viabilidade
POTENCIAL DE	61 – 80	Alta Viabilidade
REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA	41 – 60	Média Viabilidade
(IVR)	21 – 40	Baixa Viabilidade
	0 - 20	<u>Muito Baixa Viabilidade</u>

Quanto mais distante a ETAR estiver do local de utilização da água, e mais complexo e difícil o transporte, pior é para a implantação do projeto, pois maiores serão os custos com o transporte e armazenamento da água residual tratada. Logo, menor é o valor de K (tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Constante do parâmetro “Complexidade de Transporte”

COMPLEXIDADE DE TRANSPORTE C_{11}	Distância (X) entre a ETAR e o local do reuso (Km)	K_{11}
	$X \leq 3$	1
	$3 < X \leq 5$	0,8
	$5 < X \leq 10$	0,6
	$10 < X \leq 15$	0,4
	$X \geq 15$	0,2

Quanto mais fiável for a ETAR, ou seja, quanto maior for o percentual de cumprimento dos requisitos ou padrão estabelecido na legislação, melhor é para a implantação de um projeto de reutilização. Logo, maior é o valor de K (tabela 5.7).

O percentual de atendimento foi calculado utilizando a metodologia descrita por Magalhães da Silva *et al.* (2021), Niku *et al.* (1979) e Silveira (2011), cujas etapas e os resultados cinstam no capítulo 7 onde é apresentado o estudo de caso.

Tabela 5.7 – Constante do parâmetro “Segurança e Resiliência da ETAR”

SEGURANÇA E RESILIÊNCIA DA ETAR C_{12}	% de atendimento	K_{12}
	81 -100	1
	61 – 80	0,8
	41 – 60	0,6
	21 – 40	0,4
	0 - 20	0,2

Se o local onde se pretende implantar um projeto de reutilização de água não possui uma legislação que apresente o padrão da água para as finalidades compatíveis, pior é para o sucesso do projeto, pois a confiança em termos de segurança para a saúde humana e ambiental fica comprometida. Logo, nessa situação o valor de K é mínimo. Se, contudo, existe uma legislação, quanto mais específica ela for, isto é, quanto mais ela refletir a realidade local, melhor é, o que corresponde a um maior valor de K (tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Constante do parâmetro “Existência de Legislação”

EXISTÊNCIA DE LEGISLAÇÃO C_{13}	Abrangência	K_{13}
	Municipal	1
	Estadual	0,8
	Nacional	0,6
	Internacional	0,4
	Inexistente	0,2

A participação dos agentes envolvidos é importante no processo de tomada de decisão pela reutilização de água e quanto maior a aceitação da população diretamente afetada pelo projeto, melhor é para o seu sucesso. Logo, maior o valor de k. O grau de aceitação pode ser medido por meio de um inquérito social (tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Constante do parâmetro “Grau de Aceitação”

GRAU DE ACEITAÇÃO C₂₁	% de aceitação	K₂₁
	81 -100	1
	61 – 80	0,8
	41 – 60	0,6
	21 – 40	0,4
	0 - 20	0,2

O grau de necessidade está relacionado com a crise hídrica enfrentada pelo local onde se pretende implantar a reutilização. Quanto maior a crise, mais justificável será, em princípio, reutilização. Logo, maior o valor de K. Na presente tese o grau de necessidade foi medido, para o estudo de caso, a partir do Índice Municipal de Alerta (IMA) estabelecido por IPECE (2023), conforme tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Constante do parâmetro “Grau de Necessidade”

GRAU DE NECESSIDADE C₂₂	Categoria de Vulnerabilidade	Classe	K₂₂
	Alta	1	1
	Média-Alto	2	0,75
	Média	3	0,50
	Baixa	4	0,25

Quanto maior o percentual de coleta e tratamento de esgoto no local onde se pretende implantar um projeto de reutilização de água, melhor é, pois, mais água estará disponível. Logo, maior o valor de K (tabela 5.11).

Tabela 5.11 – Constante do parâmetro “Universalização da Coleta e Tratamento de Esgoto”

UNIVERSALIZAÇÃO DA COLETA E TRATAMENTO DE ESGOTO C₂₃	% de cobertura	K₂₃
	81 -100	1
	61 – 80	0,8
	41 – 60	0,6
	21 – 40	0,4
	0 - 20	0,2

O risco para a saúde pública está relacionado com a fiabilidade da ETAR, ou seja, quanto mais fiável for o desempenho da ETAR, menor o risco para a saúde pública. Logo, maior o valor de K (tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Constante do parâmetro “Risco para Saúde Pública”

RISCO PARA SAÚDE PÚBLICA C₃₁	Classificação	K₃₁
	Extremamente Alto	0,2
	Alto	0,4
	Médio Alto	0,6
	Baixo Médio	0,8
	Baixo	1

Quanto maior o consumo de energia de fontes não renováveis, mais emissões de GEE e, portanto, mais prejudicial ao ambiente será. Logo, menor o valor de K (tabela 5.13).

Tabela 5.13 – Constante do parâmetro “Consumo de Energia na ETAR”

CONSUMO DE ENERGIA NA ETAR C₃₂	Classificação	K₃₂
	Extremamente Alto	0,2
	Alto	0,4
	Médio Alto	0,6
	Baixo Médio	0,8
	Baixo	1

O risco para o ambiente está relacionado com a possibilidade de contaminação do solo e águas, subterrâneas e superficiais, com a prática da reutilização de água. Assim, quanto mais fiável for a ETAR, menor o risco para o ambiente e melhor é para a implantação da reutilização. Logo, maior o valor de K (tabela 5.14).

Tabela 5.14 – Constante do parâmetro “Risco para o Ambiente”

RISCO PARA O AMBIENTE C₃₃	Classificação	K₃₃
	Extremamente Alto	0,2
	Alto	0,4
	Médio Alto	0,6
	Baixo Médio	0,8
	Baixo	1

Se for necessário acrescentar etapas de tratamento para produzir uma água dentro do padrão requerido pela legislação, os custos para implantação do projeto de reutilização aumentarão. Assim como quanto mais distante a ETAR estiver do local de utilização, maiores serão os custos. Logo, nessas situações, pior é para a viabilidade do projeto e, dessa forma, menor é o valor de K (tabela 5.15).

Tabela 5.15 – Constante do parâmetro “Investimento Necessário”

INVESTIMENTO NECESSÁRIO C_{41}	Classificação	K_{41}
	Extremamente Alto	0,2
	Alto	0,4
	Médio Alto	0,6
	Baixo Médio	0,8
	Baixo	1

Quanto mais onerosa for a manutenção e operação da ETAR, pior é para a implantação do projeto de reutilização. Logo, menor o valor de K (tabela 5.16).

Tabela 5.16 – Constante do parâmetro “Encargos de Operação e Manutenção”

ENCARGOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO C_{42}	Classificação	K_{42}
	Extremamente Alto	0,2
	Alto	0,4
	Médio Alto	0,6
	Baixo Médio	0,8
	Baixo	1

Quanto maiores forem os benefícios econômicos advindos com a implantação do projeto de reutilização, como aumento da produtividade agrícola ou redução do consumo de água de fonte convencional, por exemplo, melhor é para a viabilidade da reutilização de água. Logo, maior o valor de K (tabela 5.17).

Tabela 5.17 – Constante do parâmetro “Benefícios Econômicos”

BENEFÍCIOS ECONÔMICOS C_{43}	Classificação	K_{43}
	Extremamente Alto	1
	Alto	0,8
	Médio Alto	0,6
	Baixo Médio	0,4
	Baixo	0,2

5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é utilizada com vistas a se obter uma medida da robustez dos resultados. Existem diversas metodologias para análise de sensibilidade descritas na literatura usadas para avaliar a estabilidade dos pesos atribuídos por especialistas (Nguyen & Tran, 2018; Oliveira, 2023).

Uma das principais abordagens é a reatribuição de valores de critério (Oliveira, 2023), por meio do método de análise de sensibilidade OAT (once-at-a-time), utilizado para entender o impacto de parâmetros individuais em um sistema ou modelo ao variar o valor de um parâmetro de cada vez, mantendo os outros parâmetros constantes, possibilitando avaliar quão sensíveis são os resultados às alterações de valor desse parâmetro específico. Neste trabalho, foi utilizada a abordagem descrita em Oliveira (2023), por meio da alteração dos pesos locais dos indicadores (critérios) e o reflexo no percentual de reutilização de água calculado pelo modelo.

Assim, para avaliar a sensibilidade, o peso C_k pode ser submetido a uma variação percentual (vp), por meio da Equação 5.14:

$$C_k = C_{k0} \pm C_{k0} \times vp \quad (5.14)$$

Em que C_{k0} é o peso local do k -ésimo indicador (critério) com a maior importância no modelo (peso original) e vp é a variação percentual a que o peso foi submetido.

Os pesos locais dos demais indicadores (critérios) C_j são proporcionalmente ajustados de acordo com a equação 5.15.

$$C_j = (1 - C_k) \times [C_{j0} / (1 - C_{k0})] \quad (5.15)$$

Em que, C_j é o novo valor do peso atribuído ao j -ésimo indicador (critério) e C_k é o peso do k -ésimo indicador (critério) num certo nível de variação percentual, calculado pela equação 5.14; C_{j0} e C_{k0} são os valores dos pesos dos indicadores (critérios) j e k no modelo de referência (com os pesos originais).

5.6 EXEMPLO DE ATRIBUIÇÃO DE PESOS AOS DIVEROS PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO

Os indicadores e parâmetros do modelo de apoio à decisão de reutilização foram identificados no capítulo 4 da presente tese. Salienta-se, contudo, que a relação de indicadores e parâmetros aqui apresentada não é taxativa, podendo, se assim entender, acrescentar muitos outros. A metodologia apresentada na presente tese,

para determinação da importância relativa de cada um dos indicadores e parâmetros do modelo, pode ser utilizada, independente do número e de quais os indicadores e parâmetros que constem no modelo, assim como também pode ser aplicada independente da localização.

Assim, a partir da metodologia descrita neste capítulo 5, apresentam-se aqui os resultados da determinação dos pesos dos indicadores e parâmetros identificados no capítulo 4, apresentando ao final o modelo de apoio à decisão para a reutilização de água.

5.6.1 Etapa 1: Desenvolvimento da estrutura hierárquica

A estrutura hierárquica está representada pela Figura 5.1, contendo 4 indicadores (critérios) e 12 parâmetros (subcritérios).

5.6.2 Etapa 2: Obtenção dos julgamentos dos especialistas

Na etapa 2, foram solicitados à especialistas para realizar as comparações par a par entre os critérios e entre os subcritérios dentro de um critério. Um formulário google forms, com as matrizes de comparação, foi enviado via e-mail, mas somente 5 especialistas retornaram com as respostas. A Tabela 5.18 ilustra o julgamento parcial do especialista 1 para os subcritérios do critério Técnico (C_1) com a escala “fuzzy” de nove pontos. Os julgamentos para os outros critérios e subcritérios da parte do especialista 1 e dos outros 4 especialistas foram conduzidos da mesma maneira e encontram-se no Anexo 4. Por simplicidade, somente os subcritérios do critério técnico C_1 são ilustrados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Julgamento dos parâmetros do indicador técnico pelo especialista 1

EMI+	MMI+	MI+	LMI+	II	LMI-	MI-	MMI-	EMI-
C_{11}				x				C_{12}
C_{11}		x						C_{13}
C_{12}			x					C_{13}

Legenda: C_{11} : complexidade de transporte; C_{12} : segurança e resiliência da ETAR; C_{13} : existência de legislação; EMI+: extremamente mais importante; MMI+: muito mais importante; MI+: mais importante; LMI+: levemente mais importante; II: igualmente importante; LMI-: levemente menos importante; MI-: menos importante; MMI-: muito menos importante; EMI-: extremamente menos importante.

A Tabela 5.19 mostra a conversão do julgamento linguístico em julgamento numérico, utilizando a escala “fuzzy” de nove pontos (Tabela 5.2), dos cinco especialistas.

Tabela 5.19 – Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador técnico

ESPECIALISTAS	ETAPA 2: JULGAMENTO DOS ESPECIALISTAS		
	$C_{11} \times C_{12}$	$C_{11} \times C_{13}$	$C_{12} \times C_{13}$
1	3	7	3
2	1/5	1/7	1
3	1/3	1/3	1
4	1/5	1/3	3
5	1/3	1	3

A Tabela 5.19 mostra que o especialista 1 classificou a complexidade do transporte (C_{11}) como levemente mais importante do que a segurança e resiliência da ETAR (C_{12}), recebendo a pontuação 3 da Tabela 5.2. Ao comparar o parâmetro C_{11} com C_{13} (existência de legislação), o especialista 1 classificou o C_{11} como muito mais importante, recebendo a pontuação 7. E por fim, ao comparar C_{12} com C_{13} ele considerou que a segurança e resiliência da ETAR é levemente mais importante do que a existência da legislação, recebendo pontuação 3. Quando a comparação classificou um subcritério menos importante do que o outro, como o julgamento do especialista 2 ao comparar $C_{11} \times C_{12}$, a notação na Tabela 5.19 é 1/5 e assim foi feito para as comparações LMI- (1/3), MI- (1/5), MMI- (1/7) e EMI- (1/9).

5.6.3 Etapa 3: Conversão dos julgamentos dos especialistas em números triangulares fuzzy

Como os julgamentos dos especialistas são linguísticos, subjetivos e incertos, as suas classificações foram convertidas de uma escala fuzzy de nove pontos para números triangulares fuzzy (l, m, u) com um fator de fuzificação (Δ) igual a 1, conforme metodologia descrita por Nguyen e Tran (2018) apresentada na seção 5.3.3.

A Tabela 5.20 mostra o julgamento dos 5 especialistas e os números triangulares fuzzy dos julgamentos com base na seção 5.3.3 para os subcritérios do

critério Técnico (C_1). A última linha da tabela mostra o valor mínimo do valor de (l), a média geométrica do valor modal (m) e o valor máximo do valor de (u) dos julgamentos dos 5 especialistas, calculados conforme equações 5.1, 5.2 e 5.3. Esses valores da última linha foram usados na etapa 4.

Tabela 5.20 – Números triangulares *fuzzy* dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador técnico (C_1)

ETAPA 3: CONVERSÃO DOS JULGAMENTOS EM NÚMEROS TRIANGULARES FUZZY									
ESPECIALISTA	$C_{11} \times C_{12}$			$C_{11} \times C_{13}$			$C_{12} \times C_{13}$		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u
1	2	3	4	6	7	8	2	3	4
2	1/6	1/5	1/4	1/8	1/7	1/6	1	1	1
3	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2	1	1	1
4	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	2	3	4
5	1/4	1/3	1/2	1	1	1	2	3	4
Min (l), Max (u) e média geométrica (m)	0,17	0,42	4	0,13	0,64	8	1	1,93	4

5.6.4 Etapa 4: Agregação dos julgamentos dos especialistas em uma matriz de julgamento *fuzzy*

Com os valores da última linha da Tabela 5.20, que foram obtidos pelas equações 5.1, 5.2 e 5.3, obteve-se a matriz de julgamento *fuzzy*, conforme Tabela 5.21, que, a título exemplificativo, apresenta os resultados dos subcritérios do critério Técnico (C_1).

Tabela 5.21 – Matriz de julgamento *Fuzzy* para os parâmetros do indicador Técnico (C_1)

C_{11}			C_{12}			C_{13}			
	l	m	u		l	m	u		
C_{11}	1	1	1	0,17	0,42	4	0,13	0,64	8
C_{12}	0,25	2,37	5,88	1	1	1	1	1,93	4
C_{13}	0,13	1,55	7,69	0,25	0,52	1	1	1	1

5.6.5 Etapa 5: Verificação da consistência

A etapa 5 consistiu na verificação da consistência dos julgamentos a partir da matriz formada com os valores modais da matriz de julgamento *fuzzy* da etapa 4, utilizando a Equação 5.4 e a Tabela 5.4. A título exemplificativo, a Tabela 5.22 apresenta a verificação da consistência dos julgamentos dos subcritérios do critério Técnico (C_1).

Tabela 5.22 – Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador Técnico (C_1)

Matriz A			Soma	Autovetor w	n	$A \times w$	λ	λ_{\max}	IC	IR	RC
	C_{11}	C_{12}	C_{13}								
C_{11}	1	0,42	0,64	2,066	0,1979	0,6016	3,03				
C_{12}	2,37	1	1,93	5,30	0,5081	3	1,5457	3,04	3,00	0,003	0,52
C_{13}	1,55	0,52	1	3,07	0,2939	0,8639	2,93				
	TOTAL		10,43								

Calculou-se a soma dos valores de cada linha da matriz e o somatório total. A partir daí calculou-se o autovetor (w) de cada linha da matriz como sendo a divisão entre a soma da linha correspondente pela soma total. O valor de n corresponde ao número de critérios da matriz. Na Tabela 5.22, a quantidade de critérios é 3. Logo, o valor de n é 3.

Na sequência, calculou-se o produto vetorial (Aw) a partir da multiplicação de cada linha da matriz pelo autovetor. O lambda λ foi então calculado a partir do quociente entre o produto vetorial e autovetor. A partir do λ obteve-se o λ_{\max} como sendo a média dos valores de λ .

O IR (índice randômico) foi retirado a partir da Tabela 5.4. Considerando que n é igual a 3, por essa tabela o valor de IR é 0,52. O IC (índice de consistência) foi calculado a partir da equação 5.4, como sendo $(\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$.

De posse desses resultados e do tamanho da matriz (n), foi possível utilizar a equação 5.4 e a Tabela 5.4 para calcular a razão de consistência. Como RC foi menor do que 0,1, a matriz A da Tabela 5.22 revela-se consistente, ou seja, o julgamento não foi aleatório.

Esse procedimento foi realizado para todos os outros subcritérios assumidos na presente tese e para a matriz de julgamento par a par dos critérios, conforme Anexo 4.

5.6.6 Etapa 6: Defuzificação da matriz de julgamento

A etapa 6 consistiu na construção da matriz de defuzificação utilizando as equações 5.8, 5.9 e 5.10, com α -cut = 0,5 e $\lambda = 0,5$. Nas equações 5.8 e 5.9, m_{ij} , l_{ij} e u_{ij} pertencem a matriz de julgamento fuzzy construída na etapa 4. A partir dos resultados obtidos com as equações 5.8 e 5.9, construiu-se a matriz defuzificada utilizando a equação 5.10. Os resultados para os subcritérios do critério técnico constam nas Tabelas 5.23, 5.24 e 5.25.

Tabela 5.23 - Cálculo do Z_{ij}^{α} para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.8

	ZL_{11}	ZL_{12}	ZL_{13}
ZL_{11}	1	0,295	0,387
ZL_{12}	1,310	1	1,466
ZL_{13}	0,838	0,383	1

Tabela 5.24 - Cálculo do Z_{ij}^{α} para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.9

	ZR_{11}	ZR_{12}	ZR_{13}
ZR_{11}	1	2,210	4,322
ZR_{12}	4,126	1	2,966
ZR_{13}	4,622	0,758	1

Tabela 5.25 - Matriz defuzificada para os parâmetros do indicador Técnico (C_1), utilizando Z_{ij}^{α} a partir da equação 5.10

	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}
Z_{11}	1	1,253	2,354
Z_{12}	2,718	1	2,216
Z_{13}	2,730	0,571	1

5.6.7 Etapa 7: Determinação dos pesos locais

A etapa 7 consistiu na determinação dos pesos locais dos indicadores e parâmetros, a partir da equação 5.11. Os resultados são apresentados na Tabela 5.26.

Tabela 5.26 – Peso Local dos Indicadores e Parâmetros

INDICADOR	Peso Local C_i	Parâmetros	Peso Local
			C_{ij}
Técnico	0,354	Complexidade de Transporte	0,340
		Segurança e Resiliência da ETAR	0,391
		Existência de Legislação	0,269
Social	0,242	Grau de Aceitação	0,435
		Grau de Necessidade	0,332
		% Coleta e Tratamento de Esgoto	0,233
Ambiental	0,132	Risco para Saúde Pública	0,676
		Consumo de Energia na ETAR	0,130
		Risco para o Ambiente	0,194
Econômico	0,272	Investimento Necessário	0,373
		Encargos de Operação e Manutenção	0,133
		Benefícios Econômicos	0,494

5.6.8 Etapa 8: Determinação do peso global

A etapa 8 consistiu na determinação dos pesos globais dos indicadores e parâmetros, a partir da equação 5.12. Os resultados são apresentados na Tabela 5.27.

Tabela 5.27 – Peso Global dos Indicadores e Parâmetros

INDICADOR	Peso Local C_i	Parâmetros	Peso Local	Peso Global
			C_{ij}	W_{ij}
Técnico	0,354	Complexidade de Transporte	0,340	0,12
		Segurança e Resiliência da ETAR	0,391	0,14
		Existência de Legislação	0,269	0,09
Social	0,242	Grau de Aceitação	0,435	0,11
		Grau de Necessidade	0,332	0,08
		% Coleta e Tratamento de Esgoto	0,233	0,06
Ambiental	0,132	Risco para Saúde Pública	0,676	0,09
		Consumo de Energia na ETAR	0,130	0,02
		Risco para o Ambiente	0,194	0,03
Econômico	0,272	Investimento Necessário	0,373	0,10
		Encargos de Operação e Manutenção	0,133	0,04
		Benefícios Econômicos	0,494	0,13

5.6.9 Modelo de apoio à decisão

De posse dos pesos globais dos indicadores e parâmetros, é possível construir e aplicar o modelo de apoio à decisão para reutilização, a partir da equação 5.13.

$$IVR = [\sum (W_{ij} \times K_{ij})] \times 100$$

Em que,

IVR = Índice de viabilidade potencial de reutilização de água (modelo)

W_{ij} = Peso global do parâmetro (subcritério)

K_{ij} = Constante de cada parâmetro (subcritério), de acordo com as tabelas 5.5 a 5.16

Dessa forma, tem-se:

$$\text{IVR} = \frac{\{(0,12K_{11})+(0,14K_{12})+(0,09K_{13})\} + \{(0,11K_{21})+(0,08K_{22})+(0,06K_{23})\} + \{(0,09K_{31})+(0,02K_{32})+(0,03K_{33})\} + \{(0,10K_{41})+(0,04K_{42})+(0,13K_{43})\}}{100} \quad (5.16)$$

5.6.10 Análise de sensibilidade

Visando avaliar a estabilidade dos resultados obtidos em razão da incerteza decorrente dos critérios selecionados e pesos definidos, procedeu-se a análise de possíveis alterações no índice proposto por meio de uma análise de sensibilidade. Para isto, utilizou-se a abordagem descrita na seção 5.5, por meio da modificação dos pesos locais dos indicadores (critérios). Foram realizadas simulações a partir do peso de referência e suas alterações nos seguintes percentuais: $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ e $\pm 15\%$.

O indicador com maior peso local foi o indicador técnico (C_1) apresentando um peso de 0,354. Com um incremento de 15%, os novos valores de pesos para os indicadores Técnico (C_1) e Social (C_2) foram calculados por meio das Equações 5.14 e 5.15, cujos resultados se apresentam seguidamente:

$$C_k = 0,354 + (0,354 \times 0,15) = 0,4072$$

$$C_j = (1 - 0,4072) \times [0,2417/(1 - 0,354)] = 0,2218$$

Em que C_k é o novo peso local do indicador técnico após uma variação positiva de 15% e C_j é o novo peso local do indicador social após uma variação positiva de 15%.

A Tabela 5.28 apresenta as mudanças realizadas nos diversos indicadores. A linha referente ao percentual 0% neste trabalho foi denominada de linha de peso base, que é o referencial para as análises das alterações aplicadas.

No que tange à ordenação dos indicadores, em todos os cenários de variação percentual, o ranking permaneceu inalterado, na seguinte ordem: TÉCNICO > ECONÔMICO > SOCIAL > AMBIENTAL, o que indica consistência dos resultados do desempenho global obtido pelo método *FuzzyAHP* para este exercício, que levou em conta a natureza subjetiva dos julgamentos realizados, indicando que pequenas perturbações (positivas ou negativas) nos pesos não alteram a ordem de importância

dos indicadores, o que sugere que decisões baseadas na ordem de importância desses indicadores serão consistentes, mesmo se houver algumas incertezas na atribuição dos pesos.

A robustez do modelo é um atributo essencial em sistemas de decisão, especialmente em cenários onde diferentes stakeholders podem atribuir pesos divergentes aos critérios. A manutenção da estabilidade na hierarquia de importância dos critérios demonstra que o modelo é capaz de suportar pequenas variações nos pesos, sem comprometer sua lógica estrutural ou a coerência do sistema.

Caso o modelo apresentasse uma sensibilidade excessiva, sua aplicabilidade prática seria severamente limitada, uma vez que variações mínimas nos parâmetros de entrada comprometeriam a confiabilidade das decisões derivadas do sistema.

Critérios com maior peso exercem influência global sobre o sistema, podendo impactar decisões de forma mais significativa e, em alguns casos, de maneira não prevista inicialmente pelo tomador de decisão. A priorização de indicadores mais representativos, que exercem maior influência no processo decisório, é reforçada como uma estratégia fundamental para garantir que as decisões tomadas sejam não apenas bem fundamentadas, mas também eficazes na seleção de áreas ou tecnologias específicas.

A Figura 5.2 apresenta a variação dos pesos locais dos indicadores em função das variações percentuais aplicadas. Nota-se uma clara tendência linear, o que ocorre em razão de a variação percentual ter sido aplicada de maneira uniforme. Além disso, pode-se visualizar uma certa estabilidade na ordem de importância na medida em que não há cruzamentos de linhas, o que evidenciaria alteração na ordem dos critérios.

A Figura 5.2 mostra visualmente a estabilidade e robustez nos pesos dos indicadores, bem como a diferença significativa entre o peso do indicador TÉCNICO e dos demais indicadores. Essa diferença sugere que em futuras análises ou decisões, o foco nos indicadores com maior peso pode ser útil na tomada de decisão.

Tabela 5.28 – Resultado da análise de sensibilidade

%	TÉCNICO	SOCIAL	AMBIENTAL	ECONÔMICO
-15%	0,3009	0,2616	0,1433	0,2942
-10%	0,3187	0,2549	0,1397	0,2867
-5%	0,3364	0,2483	0,1360	0,2793
0%	0,3541	0,2417	0,1324	0,2718
5%	0,3718	0,2351	0,1288	0,2644
10%	0,3895	0,2285	0,1252	0,2569
15%	0,4072	0,2218	0,1215	0,2495

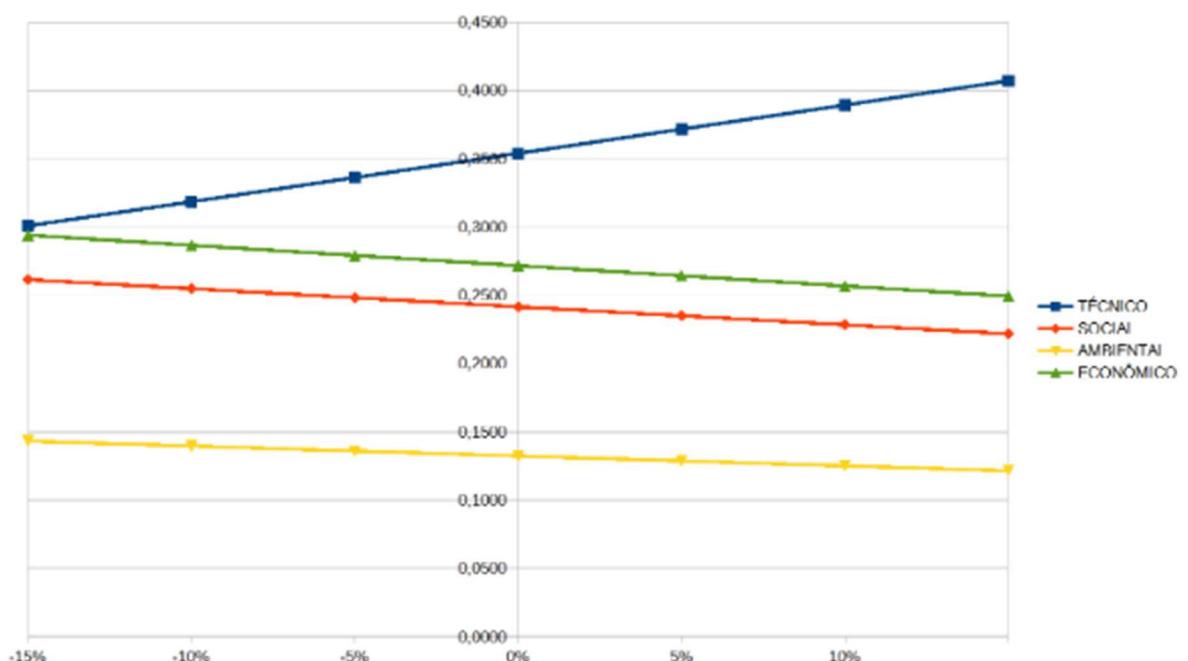


Figura 5.2 – Análise de sensibilidade

6. ESTUDO DE CASO NO BRASIL: APLICAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO AO SISTEMA DA ETAR DE AQUIRAZ

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para exemplificação da aplicação do modelo de apoio à decisão proposto, utilizou-se o estudo de caso da cidade de Aquiraz, localizada no litoral do Estado do Ceará, região semi-árida do Nordeste brasileiro. Para tanto, é preciso conhecer as constantes K de cada parâmetro do modelo, a partir das características regionais e da cidade.

Nessa etapa foram contactados os órgãos públicos envolvidos com o setor da água e infraestruturas da área em estudo, tais como: a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), a Prefeitura Municipal de Aquiraz, a Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH), a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) e o Instituto de Pesquisa e estratégia do Estado do Ceará (IPECE).

Para a caracterização climatológica e socioeconômica, utilizaram-se as informações prestadas por Prefeitura Municipal de Aquiraz (2017).

Para o conhecimento da demanda de água do município de Aquiraz, tomou-se por base as outorgas de uso da água vigentes, expedidas pela SRH, pois é uma fonte oficial do Governo do Estado acerca das autorizações para uso da água. Para tanto, pesquisou-se no sítio eletrônico da COGERH, no endereço http://outorgasvigentes.cogerh.com.br/paginaSemValidacao/outorgaVigente/outorgas_fh.xhtml e preencheram-se os seguintes campos:

- Tipo de outorga para pesquisa: outorga de uso;
- Bacia: metropolitana;
- Município: Aquiraz;
- Situação da Outorga: outorgas concedidas/vigentes

Em seguida, clicou-se em Realizar Pesquisa. De posse do resultado, clicou-se em “Exportar para Excel”.

Para o conhecimento da geração e tratamento de esgoto no município de Aquiraz, tomou-se por base as informações prestadas pela CAGECE, empresa responsável pela coleta, tratamento e disposição do efluente tratado.

6.2 CARACETRIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA E SÓCIOECONÔMICA DE AQUIRAZ

O Estado do Ceará localiza-se no domínio da Caatinga, com clima Tropical Semiárido. A pluviosidade média anual no Estado apresenta-se concentrada no espaço e no tempo, podendo ser menor que 500 mm, em algumas regiões, mas também pode se aproximar de 1.000 mm, ou mesmo mais, nas cidades localizadas na faixa litorânea. Ou seja, a chuva não é distribuída igualmente por todo o território cearense e nem chove uniformemente durante o ano todo, concentrando-se basicamente em apenas 4 meses (Andrade *et al.*, 2020).

O Ceará é ainda o único a estar completamente inserido na sub-região do sertão. A temperatura média é alta, com pequena amplitude anual de, aproximadamente, 5 oC, girando entre meados de 20 oC no topo das serras a até 28 oC nos sertões mais quentes (Andrade *et al.*, 2020).

De acordo com WRI Brasil (2019), no Brasil, regiões da Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte sofrem com níveis “extremamente altos” de risco de crise hídrica, um nível semelhante ao dos países do Médio Oriente.

Especificamente sobre Aquiraz, segundo IPECE (2023) essa cidade pertence a classe de vulnerabilidade 3. O Estado do Ceará desenvolveu o Índice Municipal de Alerta (IMA) como uma ferramenta crucial para avaliação da vulnerabilidade dos municípios cearenses diante dos desafios climáticos, agrícolas e sociais. O IMA é avaliado para os 184 municípios do Ceará a partir da análise de 12 indicadores, os quais almejam identificar a vulnerabilidade dos municípios no que diz respeito aos aspectos climatológicos, agrícolas e sociais, no âmbito da meteorologia, produção agrícola e assistência social. Após o cálculo do IMA de cada município, foi realizada a classificação deles em quatro classes de vulnerabilidade e Aquiraz, em 2023, apresentou um IMA de 0,5923 e foi classificado na classe 3, com média vulnerabilidade, conforme Figura 6.1 e Tabela 6.1 (IPECE, 2023).

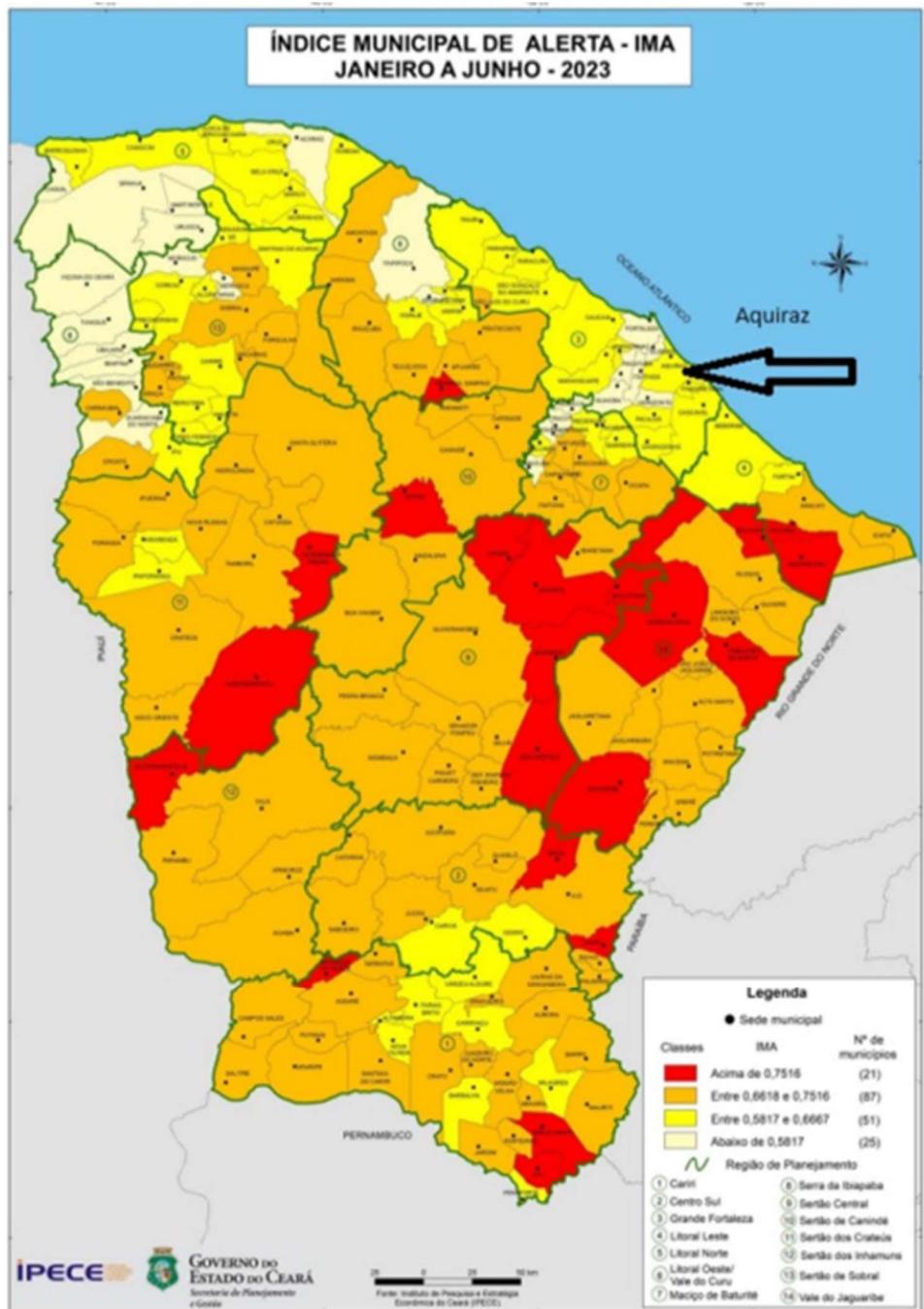


Figura 6.1 - Índice Municipal de Alerta – 2023

Tabela 6.1 – Classes de Vulnerabilidades segundo o IMA 2023

CLASSE	INTERVALO DO IMA	COR NO MAPA
1 – Alta Vulnerabilidade	Acima de 0,7516	Vermelho
2 – Média-Alta Vulnerabilidade	Entre 0,6618 e 0,7516	Laranja
3 – Média Vulnerabilidade	Entre 0,5817 e 0,6667	Amarelo
4 – Baixa Vulnerabilidade	Abaixo de 0,5817	Amarelo claro

O município de Aquiraz, distante 21,0 km em linha reta de Fortaleza, capital do Estado, situa-se na porção nordeste do Estado do Ceará, ocupando uma área de 482,8 km², correspondendo a 0,32% do território estadual. É limitada ao norte pelo Oceano Atlântico, Fortaleza e Eusébio; ao sul por Horizonte, Cascavel e Pindoretama; a leste pelo Oceano Atlântico; e a oeste por Eusébio, Itaitinga e Horizonte (Figura 6.2).

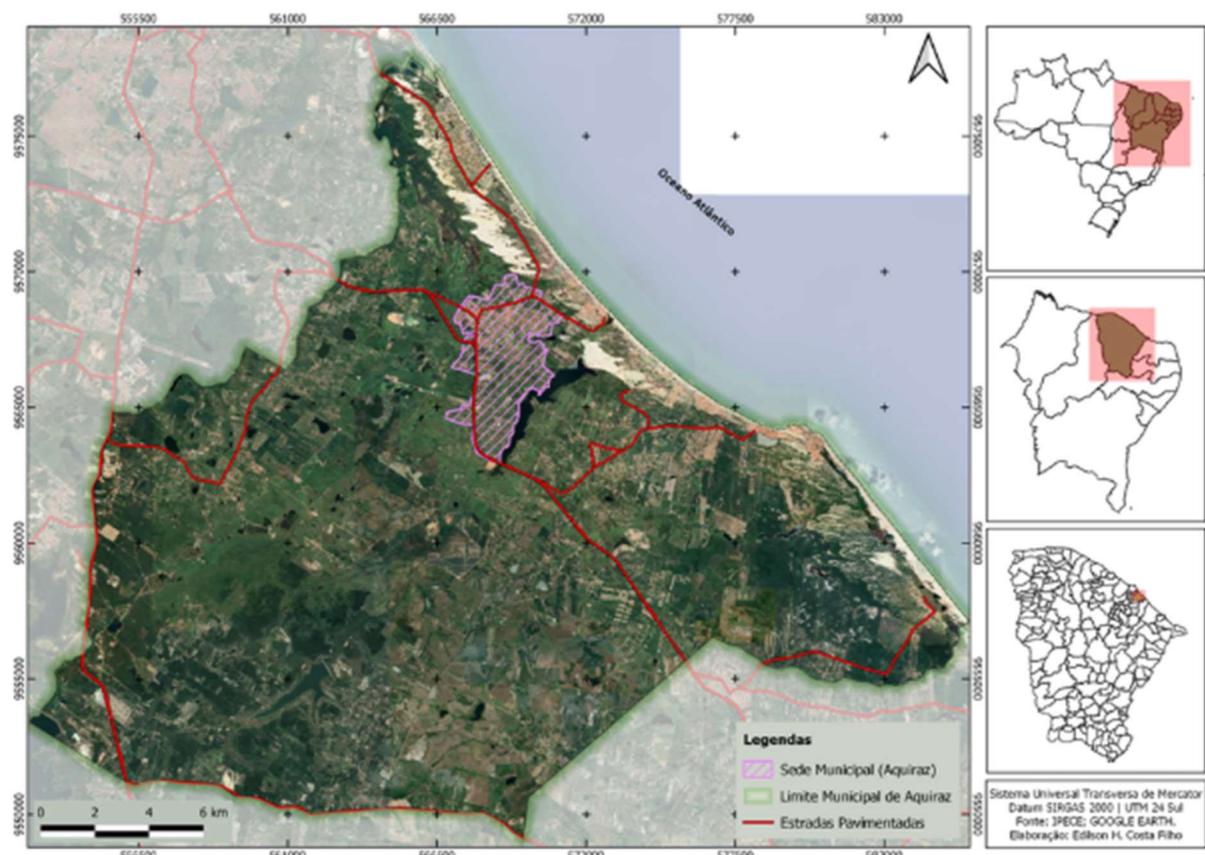


Figura 6.2 - Mapa de localização do município de Aquiraz

A ocupação do território de Aquiraz deu-se através do desenvolvimento da agricultura, especialmente durante o século XIX. Entretanto, a atividade pecuária também se destaca no município. Os engenhos de rapadura e casas de farinha ilustram a importância da cultura canavieira e do beneficiamento da mandioca para a região, atividades ainda significativas nesse território, a exemplo das indústrias de cachaça lá instaladas. A economia do município é baseada no estabelecimento de indústrias e serviços de apoio à atividade turística, além da exploração de atividades agropecuárias voltadas para a produção de alimentos, essencialmente produtos hortifrutigranjeiros (Prefeitura Municipal de Aquiraz, 2017).

A atividade industrial também se destaca em Aquiraz. Desde 1996 vem se consolidando a implantação de indústrias, atraídas por um conjunto de incentivos fiscais do Governo Estadual e Municipal, através do Programa de Promoção Industrial e Atração de Investimentos (Prefeitura Municipal de Aquiraz, 2017).

A produção agrícola municipal é montada em bases tradicionais, com o cultivo de produtos de pouca expressividade em nível de Estado. Os produtos com maior destaque, em termos de área cultivada e representatividade estadual, são a castanha de caju, o coco da baía, a cana-de-açúcar, o mamão e a manga (Prefeitura Municipal de Aquiraz, 2017).

As culturas de subsistência (feijão, milho e mandioca) têm obtido baixos rendimentos por área colhida e até perda de safras, em decorrência das irregularidades climáticas, falta de crédito nas instituições financeiras e apoio técnico (Prefeitura Municipal de Aquiraz, 2017).

Para um conhecimento mais atualizado dos empreendimentos do município de Aquiraz, a presente tese considerou aqueles que possuem outorga de uso da água vigente, expedida pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH), no sentido de estimar a demanda hídrica do município, conforme Figura 6.3 e Anexo 2.

A Figura 6.3 foi construída com base em dados constantes no Anexo 2. Observam-se empreendimentos localizados no município de Aquiraz, com outorga de uso de água vigente, expedida pela Secretaria de Recursos Hídricos (SRH). O município de Aquiraz, no que se refere ao uso de água bruta, possui 34 indústrias, 05 projetos de irrigação, 3 projetos de piscicultura, 49 empreendimentos classificados como de serviço e comércio e 36 classificados como demais usos.

Quanto a distância desses empreendimentos para a ETAR, na Figura 6.3 identificam-se os empreendimentos que estão em um raio de 1km, 5km e 10km de distância da ETAR. Na região mais próxima da ETAR (1km e 5km) observam-se algumas indústrias, empreendimentos do tipo serviço e comércio, projetos de irrigação e de piscicultura. No raio de 10 km encontram-se a maioria dos empreendimentos do tipo demais usos e serviço e comércio.

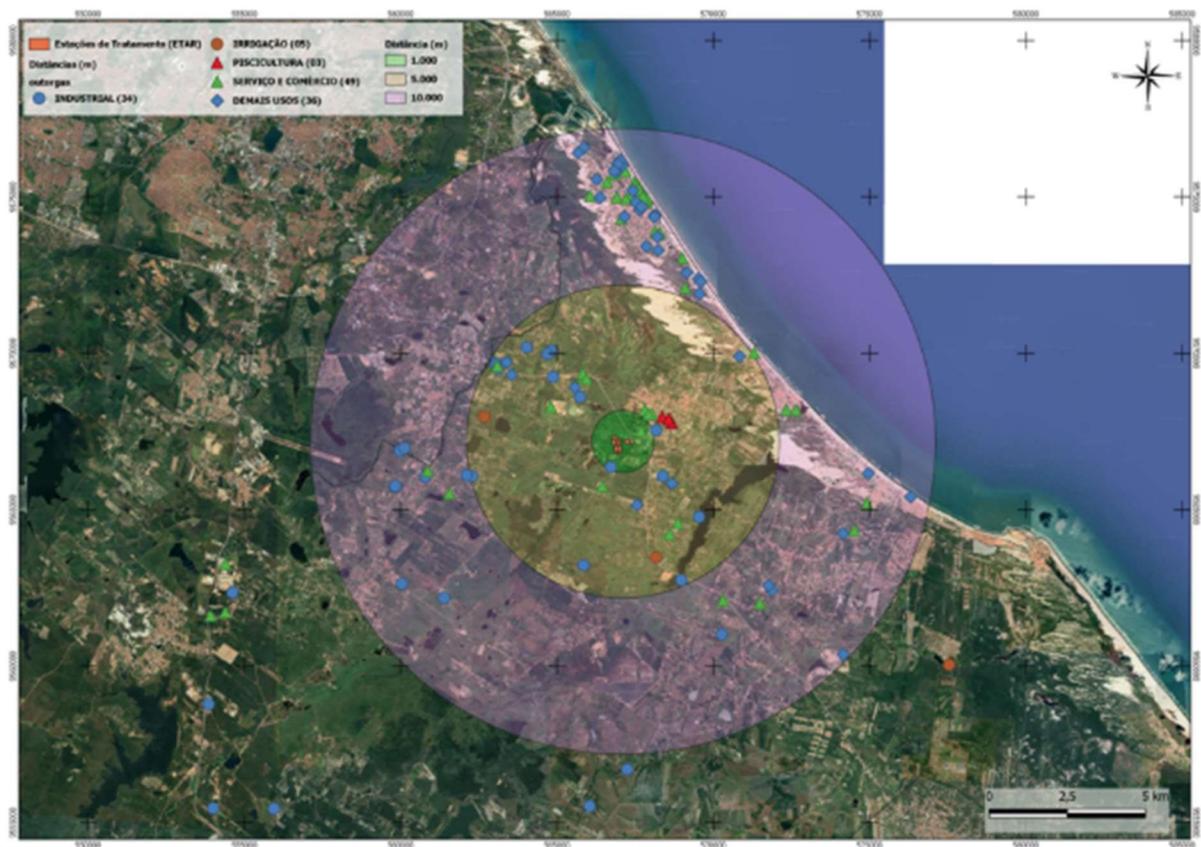


Figura 6.3 - Mapa de localização dos empreendimentos localizados em Aquiraz e com outorga de uso de água

6.3 RECURSOS HÍDRICOS DA CIDADE DE AQUIRAZ

O município de Aquiraz encontra-se inserido na região das Bacias Hidrográficas Metropolitanas. Estas situam-se na porção nordeste do Estado, limitadas ao sul pela Bacia do Banabuiú, a leste pela Bacia do Baixo Jaguaribe, a oeste pela Bacia do Curu, e ao norte, pelo Oceano Atlântico.

Todos os cursos d'água das Bacias Metropolitanas apresentam caráter intermitente, permanecendo secos a maior parte do ano, exceto nos trechos de jusante próximos do litoral, onde os rios Cocó e Coaçu se tornam semi-perenes (SRH, 2010). Essa característica já denota a baixa capacidade de diluição e autodepuração dos rios dessa bacia, o que pode comprometer a sua qualidade quando do lançamento de efluente, mesmo tratado, quando o sistema de tratamento e a legislação vigente não leva em consideração essa situação. Vislumbra-se, assim, a importância da prática da reutilização de água como forma de proteção da qualidade ambiental dos

recursos hídricos dessa bacia hidrográfica (indicador ambiental, parâmetro “risco para o ambiente”).

De acordo com o Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas (PGABM), foram identificados na bacia metropolitana vários problemas ambientais com impactos no saneamento básico de Aquiraz. Em busca da melhoria das condições ambientais, o PGABM de 2010 recomendou, dentre outras ações, o aumento da reutilização de água para irrigação ou para usos industriais (SRH, 2010).

6.4 CARACTERÍSTICAS URBANAS E TENDÊNCIAS OCUPACIONAIS DE AQUIRAZ

O município apresenta uma área de 482,8 km² divididos entre o Distrito Sede e os distritos de Assis Teixeira, Camará, Caponga da Bernarda, Jacaúna, João de Castro, Justiniano de Serpa, Patacas e Tapera. Nestes, conforme Censo de 2010 do IBGE, distribuía-se uma população de 72.628 habitantes, dos quais 92,36% concentravam-se na área urbana. Entretanto, em grande parte do território persistem características nitidamente rurais, seja na configuração espacial, seja nas atividades econômicas que lá se desenvolvem (Prefeitura Municipal de Aquiraz, 2017).

A sede do município, onde localiza-se a Estação de Tratamento de Água Residual (ETAR), destaca-se não só por concentrar os equipamentos institucionais mais importantes, mas também por abrigar interessante conjunto arquitetônico e urbanístico que remonta ao período colonial. Além das edificações de relevante valor histórico e cultural, a Sede de Aquiraz abriga as instalações dos poderes executivo e legislativo.

Com relação aos equipamentos de uso recreativo, há predominância de espaços privados como bares, restaurantes e outros estabelecimentos afins. Existem três quadras desportivas na Cidade: Ginásio Coberto José de Sousa e as quadras do Centro Comunitário Otoni Sá e do Centro Educacional Antonieta Alencar Castelo Branco. A Cidade possui, também, um estádio de futebol (Estádio Municipal Alberto Targino). Entretanto, observa-se carência de outros espaços públicos. Há apenas duas praças que se destacam: a Praça Cônego Araripe (Praça da Matriz) e a Praça da LBA. Ambas possuem escala agradável e excelente arborização, com árvores frondosas, gerando boa área de sombra, especialmente a primeira.

A população total urbana do município de Aquiraz teve um crescimento de 34,12% no período 1991-2000 e de 22,68% no período 2000-2010, com um crescimento total de 64,53% em 3 décadas, no período entre 1991 e 2010. Por outro lado, a população total rural apresentou um decréscimo de 4,18% entre 2000 e 2010, crescendo apenas 0,22% no período 1991-2010 (Prefeitura Municipal de Aquiraz, 2017).

6.5 DEMANDA HÍDRICA DE AQUIRAZ

O consumo de água anual do município de Aquiraz foi determinado com base nos dados referentes às outorgas vigentes expedidas pela Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), de acordo com a Tabela 6.2 e Figura 6.4.

Pela Tabela 6.2 e Figura 6.4, observa-se que o volume anual de água bruta outorgado no município de Aquiraz foi de 31.716.986,69 m³, correspondendo a vazão anual de 1.612,78 L/s. Inicialmente, destaca-se que a origem dessa água bruta é tanto de manancial superficial quanto subterrâneo. Desse volume outorgado, 65,49% correspondem a outorga para lançamento de efluente em recurso hídrico, ou seja, a maior parte do volume presente na Tabela 6.2, na verdade, não é de água requerida pelo município para uso em alguma atividade.

Tabela 6.2- Volume de água outorgado no município de Aquiraz, com base nas outorgas vigentes expedidas pela SRH

TIPO DE USO	VOLUME OUTORGADO (m ³ /ano)	VAZÃO OUTORGADA (L/s)
DILUIÇÃO DE EFLUENTES	20.772.891,46	658,66
INDUSTRIAL	6.709.176,50	251,68
SERVIÇO E COMÉRCIO	1.678.061,78	525,91
ABASTECIMENTO HUMANO	909.831,63	39,72
IRRIGAÇÃO	484.856,34	40,02
AQUICULTURA	27.553,53	6,80
DESEDENTAÇÃO DE ANIMAIS	23.783,40	2,19
DEMAIS USOS	1.110.832,05	87,80
TOTAL	31.716.986,69	1.612,78

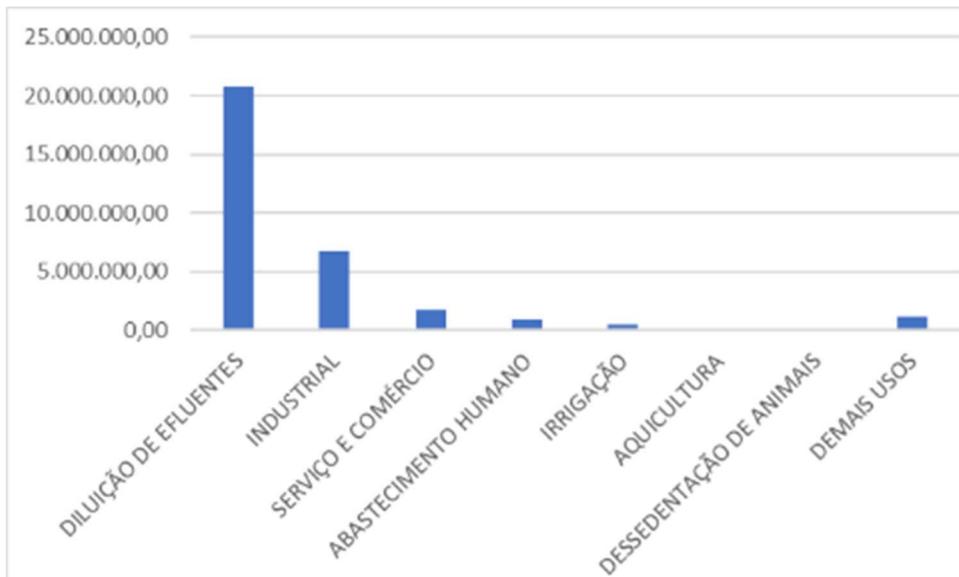


Figura 6.4: Volume de água bruta outorgado, por ano, na cidade de Aquiraz

Ainda relativamente à Tabela 6.2, 2,87% correspondem ao volume outorgado para abastecimento humano e 0,07% ao volume outorgado para dessedentação de animais, utilidades cuja reutilização de água residual tratada não é permitida pela Resolução COEMA Nº 02/2017.

Assim, para efeitos do volume de água requerido pelo município de Aquiraz para atividades cuja reutilização pode ser permitida, não se considera o abastecimento humano, a dessedentação de animal e o lançamento de efluente. Logo, o volume de água bruta atualmente requerido pelo município de Aquiraz é de 10.010.480,20 m³/ano, correspondendo a uma vazão de 912,21 L/s.

Pela Figura 6.5, observa-se que dos 127 empreendimentos no município de Aquiraz com outorga vigente (excluindo-se o abastecimento humano, a dessedentação de animal e o lançamento de efluente), 49 (38,58%) é do tipo serviço e comércio, 36 (28,35%) é do tipo demais usos, 34 (26,77%) é do tipo indústria, 5 (3,94%) é do tipo irrigação e 3 (2,36%) é do tipo aquicultura.

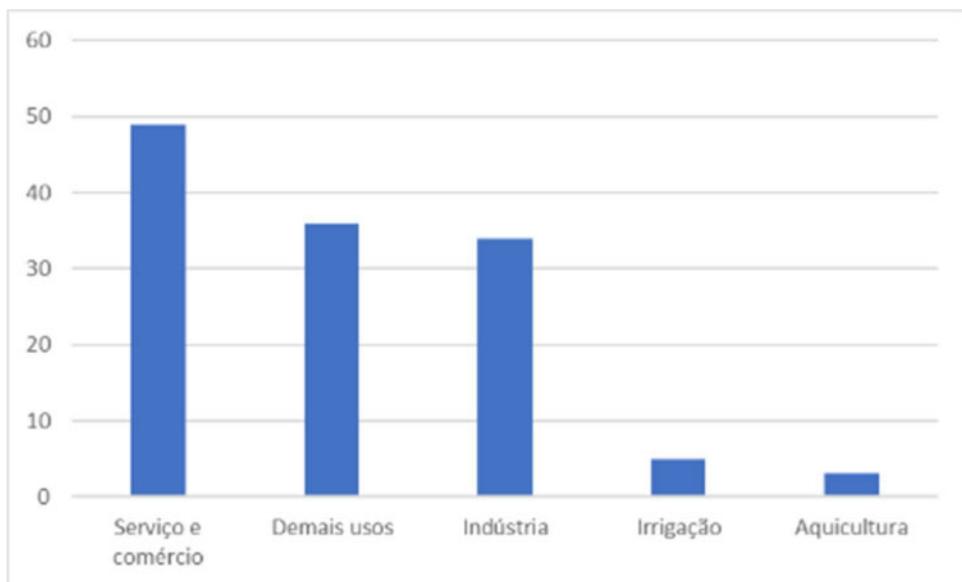


Figura 6.5: Tipos de empreendimentos no município de Aquiraz passíveis de usar água residual tratada

6.6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUAL TRATADA NA ETAR DE AQUIRAZ

Segundo IPECE (2022), a taxa de cobertura de esgotamento sanitário em Aquiraz, em 2022, era de 44,3%. O esgoto tratado na Estação de Tratamento de Água Residual de Aquiraz é de origem doméstica e oriundo das cidades de Aquiraz e Eusébio. Essa ETAR é operada pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e, de acordo com a outorga para lançamento de efluente expedida pela SRH à CAGECE de Aquiraz, essa ETAR está autorizada a lançar água residual tratada no Rio Pacoti a uma vazão de 235,76 L/s, suficiente para atender a demanda para aquicultura e irrigação, ou a quase totalidade da demanda do setor industrial do município de Aquiraz. Salienta-se, contudo, que essa é a vazão máxima autorizada para lançamento de água residual tratada no Rio Pacoti, mas a vazão média real de lançamento é menor, conforme será visto adiante, pois a ETAR não está a operar na sua capacidade máxima.

O sistema de esgotamento sanitário do município de Aquiraz é do tipo unificado (unitário, como é vulgarmente utilizado em português) e serve a população urbana de Aquiraz e Eusébio, sendo operado pela CAGECE com descarga para o rio Pacoti.

Atualmente conta com 36 mil metros de rede coletora e atende cerca de 2.300 ligações, correspondendo a uma população coberta de 13.739 habitantes em Aquiraz e 6.906 habitantes em Eusébio.

Esse sistema possui 10 estações elevatórias de esgoto (EEE), sendo 6 em Eusébio e 4 em Aquiraz.

A área onde está localizada a ETAR possui, na verdade, 3 estações de tratamento, mas somente uma delas é a responsável por receber e tratar o esgoto doméstico coletado na zona urbana de Aquiraz e Eusébio. A ETAR objeto do estudo da presente tese é constituída por oito lagoas de estabilização dividida em dois módulos de quatro lagoas. Cada módulo, ou linha de tratamento, é constituído por uma lagoa anaeróbia, uma lagoa facultativa e duas lagoas de maturação, conforme Figura 6.6 a 6.13. Atualmente, somente um dos módulos encontra-se em funcionamento.

Este tipo de tratamento é perfeitamente adequado às condições socioeconômicas, climáticas e geográficas encontradas na região, seja pela simplicidade de operação e manutenção, pela elevada temperatura média local e pela facilidade de dispor de área para a sua construção.

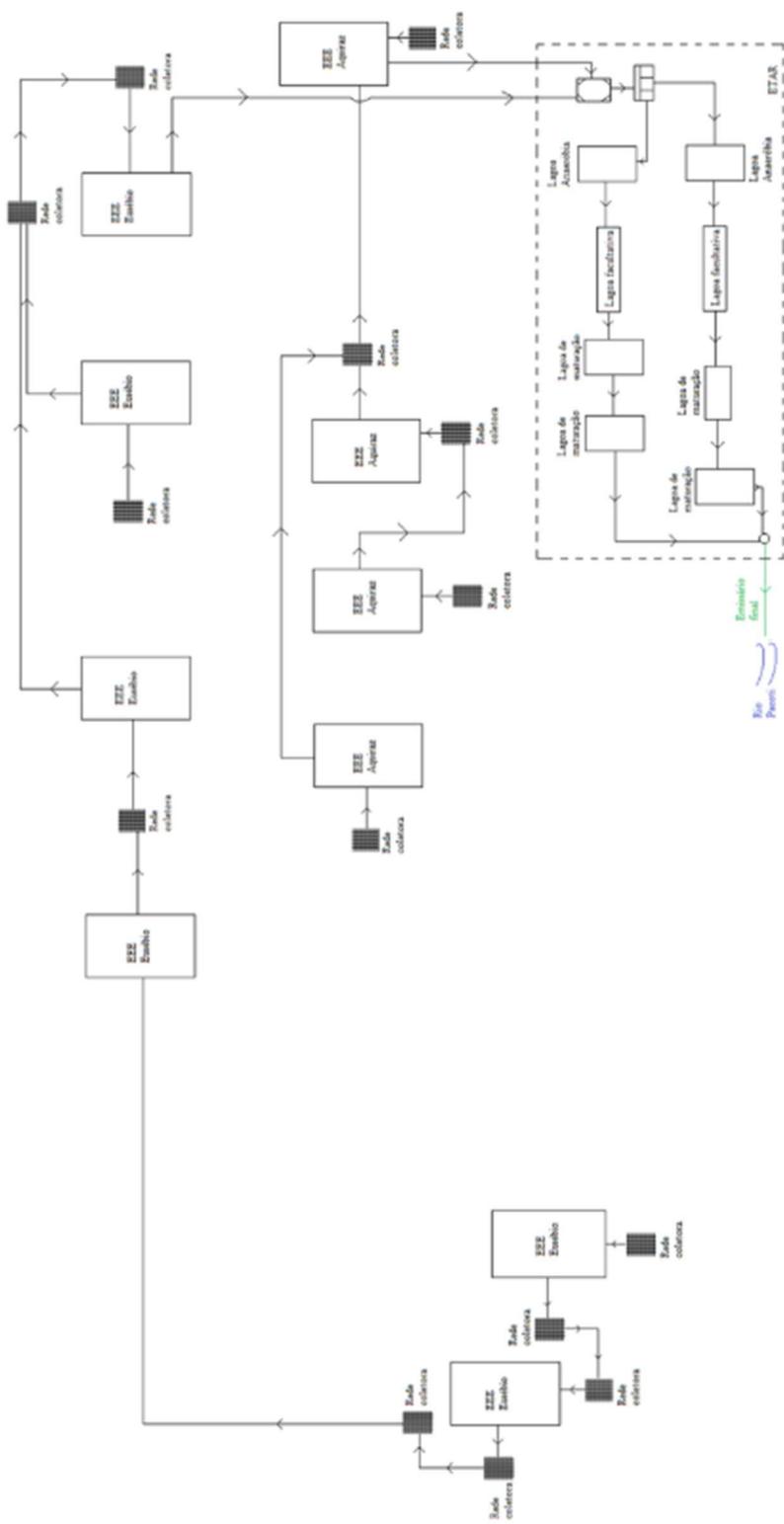


Figura 6.6- Esquema ilustrativo do Sistema de Esgotamento Sanitário de Aquiraz



Figura 6.7 - Foto da entrada do efluente na lagoa anaeróbia



Figura 6.8 - Vista da lagoa anaeróbia



Figura 6.9 - Vista da lagoa facultativa



Figura 6.10 - Foto das lagoas de maturação



Figura 6.11 - Vista das lagoas de maturação



Figura 6.12 - Lagoa de maturação



Figura 6.13 - Ponto de coleta na lagoa de maturação

Na tabela 6.3 apresentam-se as características (retiradas do projeto fornecido pela CAGECE) da ETAR de Aquiraz.

Tabela 6.3 – Características de projeto da ETAR de Aquiraz

Parâmetros	UNIDADE	Valores
Per capita residente	l/hab x dia	150
Coeficiente de variação máxima diária		1,2
Coeficiente de variação máxima horária		1,5
Coeficiente de variação mínima diária		0,5
Taxa de infiltração	l/s x km	0,5
Contribuição de CBO ₅ (DBO ₅) per capita	g/hab x dia	50
Concentração de CBO ₅ (DBO ₅) no esgoto bruto	g/m ³	320,29
Concentração de <i>E. coli</i> no esgoto bruto	CF/100ml	5x10 ⁷
Vazão máxima	L/s	103,43
Vazão média	L/s	68,62
Vazão mínima	L/s	46,86
LAGOA ANAERÓBIA		
Vazão média	L/s	100
Comprimento	m	100
Largura	m	55
Profundidade	m	4
Volume	m ³	22.000
Tempo de detenção	dias	5
Eficiência de remoção de CBO ₅ (DBO ₅)	%	60
LAGOA FACULTATIVA		
Vazão média	L/s	68,62
Comprimento	m	329,11
Largura	m	164,56
Profundidade	m	1,5
Volume	m ³	81.237
Tempo de detenção	dias	13,7
Eficiência de remoção de CBO ₅ (DBO ₅)	%	83,53
LAGOA DE MATURAÇÃO (CADA)		
Vazão média	L/s	68,62
Comprimento	m	235,23
Largura	m	117,62
Profundidade	m	NF
Volume	m ³	41.501,39
Tempo de detenção	dias	7
Eficiência de remoção de CBO ₅ (DBO ₅)	%	58,33

NF: Não fornecido pela CAGECE

No âmbito desta tese, a caracterização da água residual tratada foi realizada a partir dos laudos laboratoriais de monitoramento da água residual tratada, fornecidos pela CAGECE. Tabularam-se os resultados referentes ao período de 2019 a 2023, os quais encontram-se no Anexo 3, referentes às amostras de água coletadas na saída da última lagoa de maturação.

Considerando que a presente tese trata da reutilização de água residual tratada, a caracterização da água produzida na ETAR de Aquiraz levou em consideração somente as variáveis *E. coli*, Ovos de Geohelminto (OG), Condutividade Elétrica (CE), pH, Razão de Adsorção de Sódio (RAS) e Temperatura, pois são as variáveis consideradas pela Resolução COEMA Nº 02/2017 para as finalidades de reutilização lá estabelecidas.

A caracterização da água residual tratada na ETAR de Aquiraz é necessária para saber as possibilidades de reutilização da água produzida, considerando os padrões estabelecidos pela Resolução COEMA Nº 02/2017 e assim poder avaliar o parâmetro “Segurança e Resiliência da ETAR”, do indicador técnico, e os parâmetros “Risco para Saúde Pública” e “Risco para o Ambiente”, do indicador ambiental.

Para avaliar a segurança e resiliência da ETAR de Aquiraz, utilizou-se o conceito de confiabilidade estabelecido por Niku *et al* (1979) como sendo a probabilidade de obter um desempenho adequado por, pelo menos, um período específico de tempo e sob determinadas condições.

De acordo com Magalhães da Silva *et al* (2021), em termos de desempenho de um sistema de tratamento de água residual, a confiabilidade pode ser entendida como a porcentagem de tempo em que se consegue cumprir os padrões de lançamento de efluentes. Por conseguinte, um sistema será completamente confiável se não houver falha no desempenho, ou seja, se não houver violação dos limites preconizados pelas legislações ambientais ou pela meta definida pela operadora.

Muitas vezes, eficiência e fiabilidade são confundidas. A eficiência de um processo refere-se a uma determinada remoção de poluente em relação à concentração afluente. Já a fiabilidade se relaciona aos dados de concentração de poluente no efluente em relação a um determinado valor limite pré-estabelecido. Em outras palavras, uma ETAR pode ser eficiente em termos médios e não ser fiável (com elevado desvio padrão das concentrações efluentes), ou ser bastante fiável ou consistente (baixo desvio padrão das concentrações efluentes) e não ser eficiente (baixas remoções na ETAR) (Magalhães da Silva *et al.*, 2021).

Para determinar uma concentração média, que garanta que a concentração do efluente estará abaixo de certo valor, com um determinado nível de fiabilidade, Niku *et al.*, (1979) desenvolveram um método que relaciona a

concentração média do constituinte (valor de projeto) com os valores limites a serem cumpridos, baseando-se em análises probabilísticas. O que se busca é avaliar, com base nessa metodologia, é o grau de fiabilidade que foi alcançado pelos sistemas experimentais utilizados e compará-los com os sistemas reais, definindo assim o limite ou o padrão de efluente que se poderia, teoricamente, garantir em cada processo.

Dessa forma, torna-se essencial que os processos de tratamento de esgotos sejam avaliados em relação à fiabilidade, fornecendo informações que podem subsidiar a seleção de um determinado sistema de tratamento e permitindo a avaliação do desempenho real de uma ETAR no que se refere ao atendimento aos requisitos legais estabelecidos ou às metas de eficiência definidas.

Em relação a eficiência, a metodologia de cálculo normalmente não considera a variabilidade inerente a cada processo de tratamento, que está diretamente associada à fiabilidade. A probabilidade de falha é extremamente sensível à função de distribuição da concentração do poluente no efluente. Assim, uma série de estudos publicados sobre a distribuição de dados de concentração de constituintes oriundos de estações de tratamento de água residual reporta que a distribuição lognormal é a que em regra fornece o melhor ajuste aos valores de concentração efluente (Magalhães da Silva *et al.*, 2021).

Na presente tese, assim, a fiabilidade foi avaliada por meio da metodologia desenvolvida por Magalhães da Silva *et al.* (2021), Niku *et al.* (1979) e Silveira (2011) para os parâmetros *E. coli*, Ovos de Geohelminto, Condutividade Elétrica, Razão de Adsorção de Sódio (RAS), pH e Temperatura, parâmetros esses considerados pela Resolução COEMA Nº 02/2017 na avaliação de projetos de reutilização de água residual tratada. A verificação da forma da distribuição de frequência desses parâmetros consistiu em testes de aderência às distribuições Lognormal, por meio dos testes Kolmogorov-Smirnov, utilizando o software SPSS versão 25.

6.6.1 Remoção de outliers

A primeira etapa da análise estatística para avaliação da fiabilidade da ETAR de Aquiraz foi a verificação da presença de outliers no banco de dados (Anexo

3), com base nos monitoramentos realizados pela CAGECE, utilizando para isso a metodologia adotada por Silveira (2011) e o software SPSS (versão 25).

A verificação e remoção de outlier consiste na eliminação de dados abaixo do limite inferior ou acima do limite superior, referentes ao quartil inferior e superior da série de dados, como mostram as Equações 6.1 e 6.2.

$$L_{inf} = Q_{inf} - 1,5(Q_{sup} - Q_{inf}) \quad (6.1)$$

$$L_{sup} = Q_{sup} + 1,5(Q_{sup} - Q_{inf}) \quad (6.2)$$

Em que:

L_{inf} – Limite inferior

L_{sup} – Limite superior

Q_{inf} – Quartil inferior

Q_{sup} – Quartil superior

Assim, de posse dos dados do Anexo 3 e com auxílio do Programa SPSS (versão 25), verificou-se se os resultados para cada uma das variáveis avaliadas possuíam *outliers*. Os resultados estão apresentados nas Figuras 6.14 a 6.18.

Pelas Figuras 6.14 a 6.18 observa-se que as variáveis *E. coli*, Condutividade Elétrica e pH apresentaram *outliers*. Esses resultados foram então excluídos do banco de dados.

A justificativa para a retirada de outliers em um banco de dados de resultados de análises químicas de efluente doméstico tratado pode ser fundamentada tanto em critérios estatísticos quanto em considerações técnicas associadas ao processo de tratamento e à confiabilidade das medições. Em primeiro lugar, outliers podem indicar erros analíticos ocasionais, como falhas no equipamento, contaminações accidentais de amostras ou registros inadequados, que não representam as condições reais do efluente tratado. Além disso, valores atípicos podem distorcer a avaliação da eficiência do sistema de tratamento, afetando indevidamente indicadores como média, desvio-padrão e limites de conformidade com padrões legais ou ambientais.

A exclusão desses valores é aceitável quando baseada em critérios estatísticos bem definidos — como a aplicação de métodos robustos de detecção de outliers (por exemplo, boxplots, z-scores ou distância de Mahalanobis) — e

acompanhada de análise técnica que comprove a improbabilidade de tais valores refletirem a realidade do sistema monitorado. Tal abordagem visa garantir a integridade e a representatividade do conjunto de dados, promovendo interpretações mais precisas sobre a qualidade do efluente e a efetividade do tratamento, conforme recomendado por Barnett e Lewis (1994) e Rousseeuw e Leroy (2003).

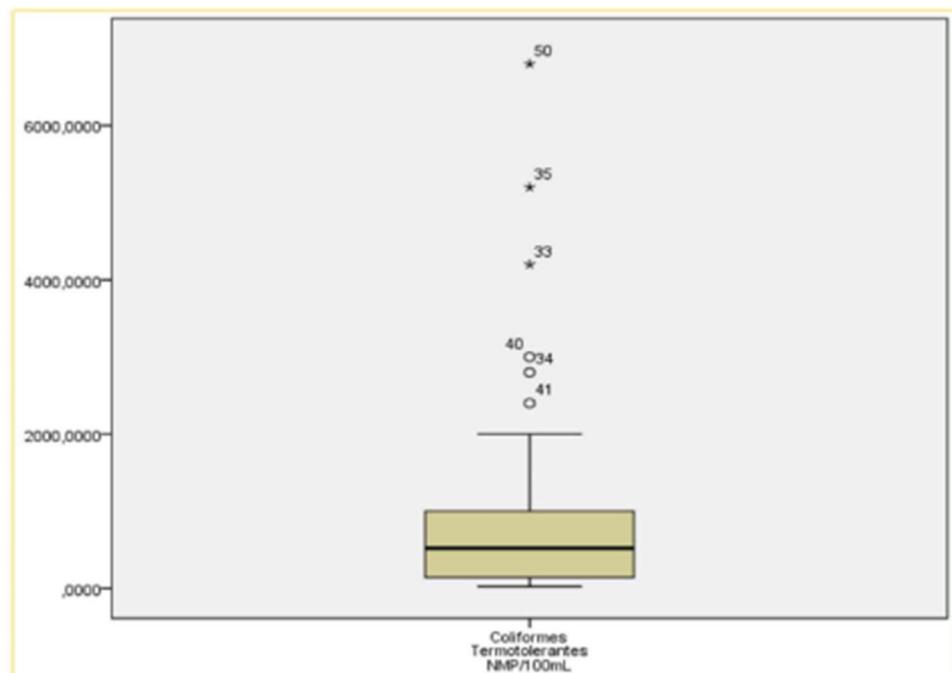


Figura 6.14 - Gráfico do tipo Boxplot para a variável *E. coli*

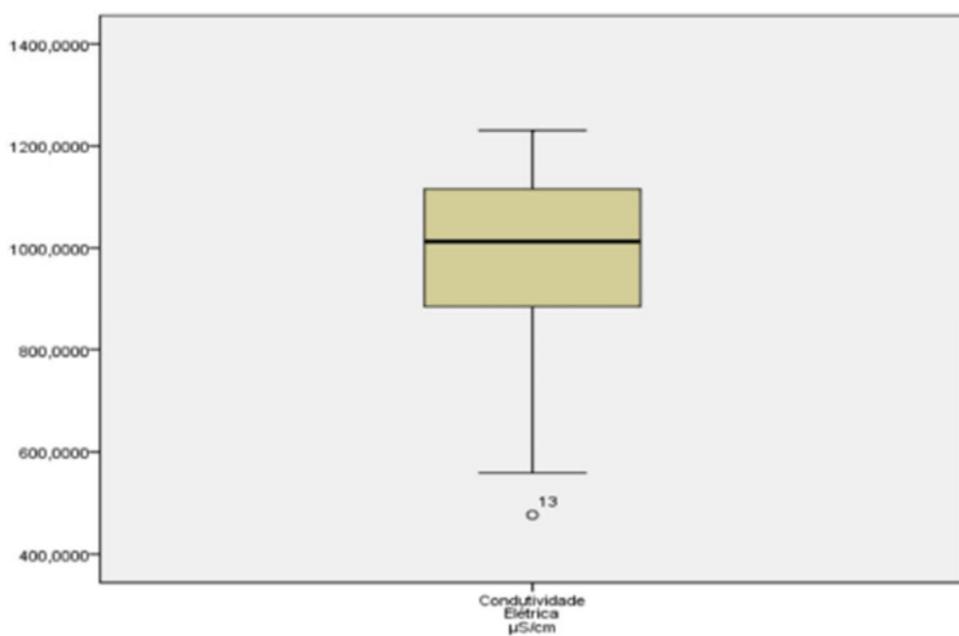


Figura 6.15 - Gráfico do tipo Boxplot para a variável Condutividade Elétrica

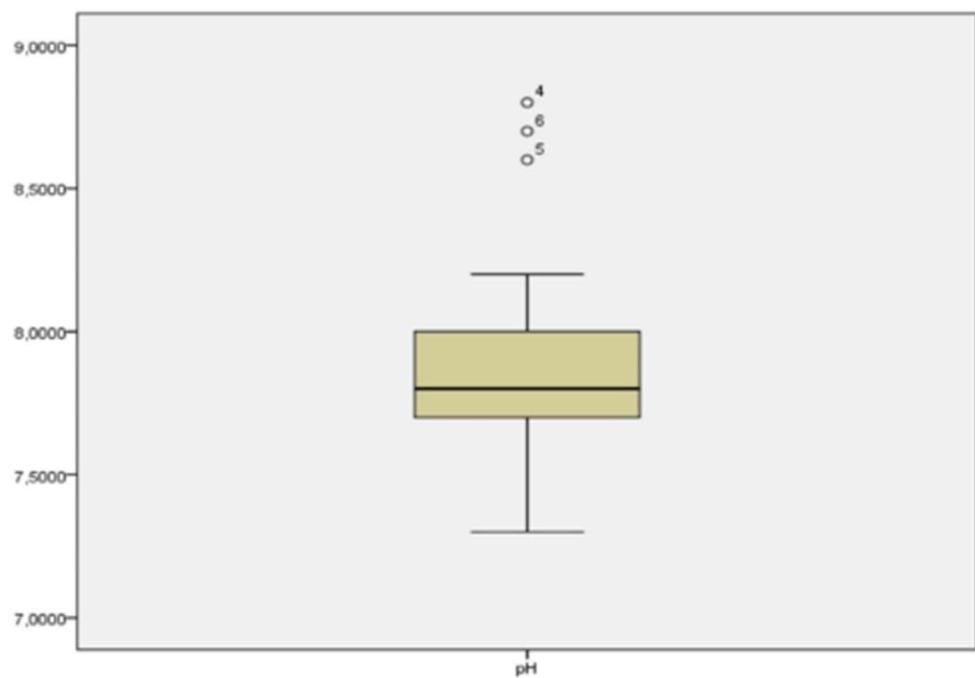


Figura 6.16 - Gráfico do tipo Boxplot para a variável pH

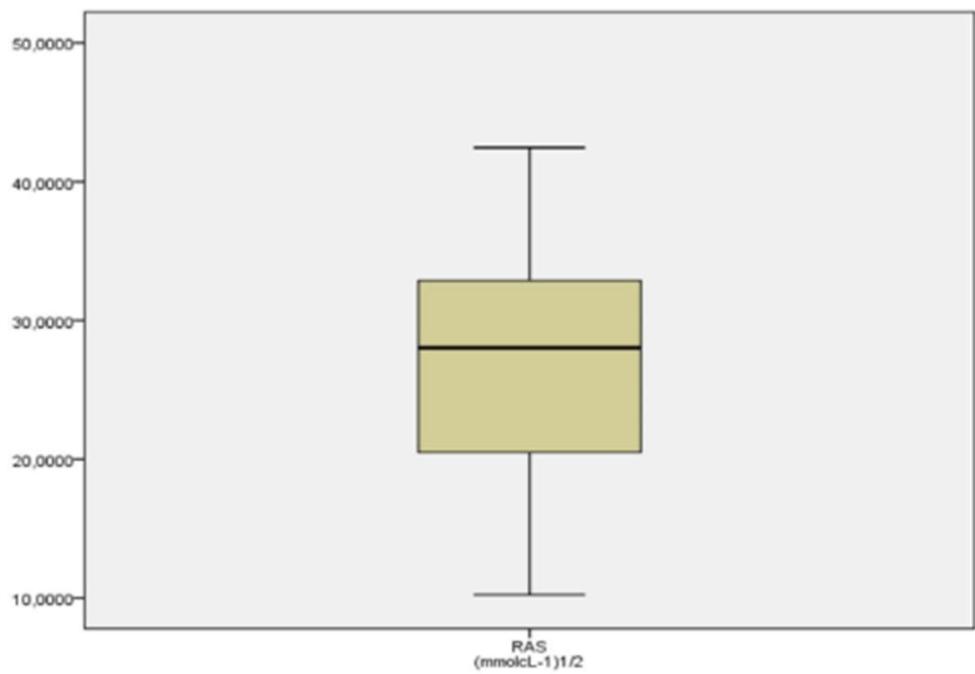


Figura 6.17 - Gráfico do tipo Boxplot para a variável RAS

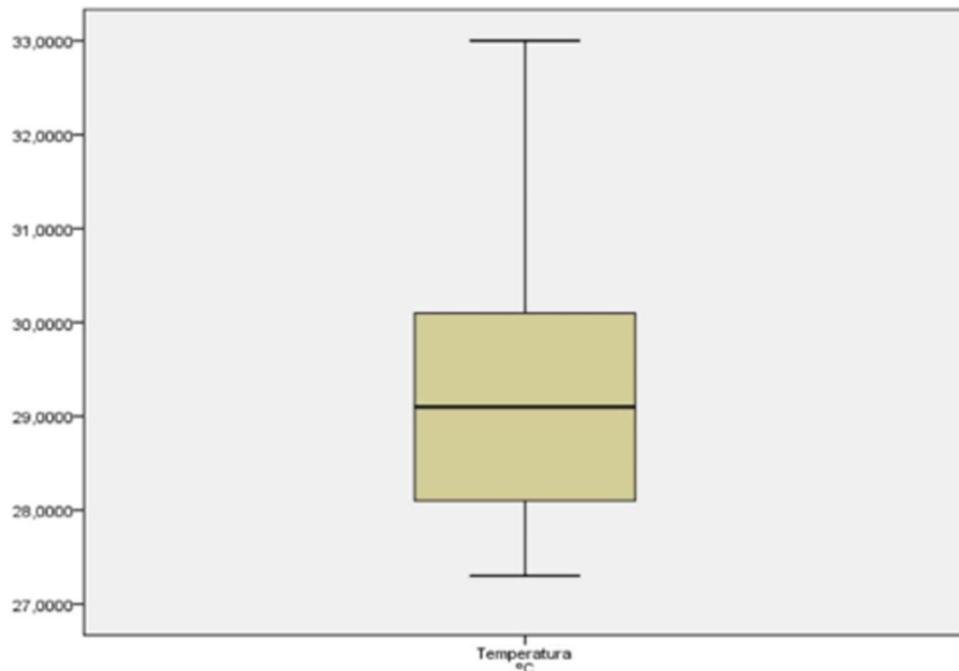


Figura 6.18- Gráfico do tipo Boxplot para a variável Temperatura

6.6.2 Estatística descritiva dos dados

Após a remoção dos outliers, foram calculadas, para cada variável, utilizando o software SPSS (versão 25), a média e o desvio padrão. A partir daí foi realizada uma análise dos dados por meio da estatística descritiva e comparadas as concentrações efluentes médias com os limites constantes na Resolução COEMA Nº 02/2017. Os resultados constam na Tabela 6.4. Não foi calculado o Desvio Padrão e a Média para os resultados da variável Ovo de Geohelminto porque todos os dados foram apresentados com a notação ND (não detectado).

Tabela 6.4 - Estatística descritiva com base nos dados do Anexo 3, excluindo-se os outliers

VARIÁVEL	DESVIO PADRÃO	MÉDIA
<i>E. coli</i>	446,66	511,33
Ovo de Geohelminto	-	-
Condutividade Elétrica	93,60	1.066,83
pH	0,2	7,81
Razão de Adsorção de Sódio	7,76	27,59
Temperatura	1,61	29,26

6.6.3 Adoção de um modelo de probabilidades

Essa etapa consistiu em verificar o pressuposto da normalidade dos dados. Pressupostos são condições mínimas que devem ser observadas nos dados para que os resultados produzidos por determinada técnica de análise sejam confiáveis e permitam fazer inferências.

Verificar os pressupostos é importante porque caso sejam violados, as probabilidades de ocorrência do erro tipo I (rejeição da hipótese de nulidade quando ela é verdadeira) e tipo II (não rejeição da hipótese de nulidade quando ela é falsa) ficam alteradas, o que pode levar a conclusões erradas.

Na presente tese essa verificação foi realizada por meio do teste de hipótese, que é uma ferramenta estatística que permite fazer inferências sobre parâmetros a partir de uma amostra de dados. A realização do teste de hipóteses seguiu quatro passos:

- definição da hipótese nula e da hipótese alternativa;
- fixação do nível de significância do teste (α);
- cálculo da estatística do teste (t , z , π , X^2);
- conclusão do teste (rejeição ou não da hipótese nula).

Em termos práticos, a decisão de rejeitar ou não a hipótese nula depende do nível de significância adotado pelo pesquisador. O nível de significância (α), para o erro tipo I, é a probabilidade de cometer um erro ao rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. Ele norteia a decisão tomada no teste de hipótese. É fixado pelo pesquisador como um “valor crítico” ou parâmetro a ser seguido. Na presente tese optou-se por trabalhar com um nível de significância de 5%.

A verificação da forma de distribuição de frequência dos resultados dos parâmetros avaliados consistiu de teste de aderência às distribuições Normal e Lognormal, por meio do teste Kolmogorov-Smirnov, realizado com o auxílio do software SPSS 25. É importante lembrar que a distribuição normal tem uma característica de ser simétrica em forma de sino e que a maioria das observações apresenta valores no intervalo médio e com um número menor de dados próximos às extremidades.

Na realização do teste de hipótese Kolmogorov-Smirnov, a hipótese nula foi de que os dados possuem uma distribuição normal ou lognormal. A partir da determinação do nível de significância α no valor de 5%, para cada constituinte, foi obtida a probabilidade de aderência às 2 distribuições e, caso essa probabilidade fosse menor do que o nível de significância, podia-se afirmar com nível de confiança de 95% que as frequências observadas diferiam da frequência esperada para a distribuição testada; caso contrário, a distribuição era elencada como candidata à distribuição mais representativa dos dados. Após a realização de todos os testes, as distribuições que apresentaram as maiores probabilidades de aderência foram eleitas as mais representativas.

Para verificação da distribuição lognormal, especificamente, realizou-se a transformação dos dados por procedimentos matemáticos que alteram o valor das variáveis de modo a corrigir problemas como a não normalidade. Transformaram-se, pois, os valores das variáveis em logarítmico na base e (ln). Os resultados estão na Tabela 6.5.

Pela Tabela 6.5 observa-se que o valor de Sig para a maioria das variáveis, antes e depois de transformadas em logarítmico (com exceção de *E. coli* antes da transformação e da condutividade elétrica após a transformação) é maior que 0,05 (5%), ou seja, a probabilidade de cometer um erro ao rejeitar a hipótese nula é muito grande. Logo, não se rejeitou a hipótese nula. Como a hipótese nula é de que os dados têm distribuição normal, ao não rejeitá-la, assume-se que os dados possuem distribuição normal. Como essa situação ocorreu para a maioria das variáveis antes e depois de transformadas em logarítmico, assumiu-se a distribuição lognormal.

Mais uma vez, em relação a variável Ovo de Geohelminto, como os resultados foram todos iguais e na notação ND (não detectado), o software SPSS entende como sendo uma variável qualitativa e, como tal, não é possível calcular a média, desvio padrão e realizar o teste de normalidade.

Tabela 6.5 – Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov

VARIÁVEL	Sig	Sig (variável transformada em Ln)
<i>E. coli</i>	0,022	0,052
Ovo de Geohelminto	-	-
Condutividade Elétrica	0,200	0,000
pH	0,176	0,112
Razão de Adsorção de Sódio	0,200	0,067
Temperatura	0,078	0,118

Verifica-se que a distribuição lognormal, embora não tenha sido a distribuição que melhor se ajustava aos dados em todos os casos, também não foi rejeitada. Logo, é possível utilizar a metodologia descrita por Niku *et al.* (1979) para o cálculo do coeficiente de fiabilidade (CDC) da ETAR de Aquiraz.

6.6.4 Cálculo da fiabilidade

Após a identificação do modelo distributivo e da estatística descritiva dos dados dos parâmetros avaliados, seguiu-se para a etapa de análise de fiabilidade. Adotou-se a metodologia desenvolvida por Niku *et al.*, (1979) e utilizada em vários trabalhos (Carvalho, 2021; Magalhães da Silva *et al.*, 2021; Silveira, 2011), que permite o cálculo do coeficiente de fiabilidade (CDC) com o intuito de estimar a fiabilidade das estações de tratamento de água residual, ou seja, estimar a fração do tempo em que a concentração efluente não excede o padrão de referência especificado. Dessa forma, o CDC foi obtido através da relação entre o coeficiente de variação dos dados (CV) e a variação padronizada para um determinado nível de fiabilidade ($Z(1-\alpha)$), conforme Equação 6.3.

$$CDC = \sqrt{CV^2 + 1} \cdot exp \quad 6.3$$

Em que:

CDC – coeficiente de fiabilidade

CV – coeficiente de variação

$Z_{1-\alpha}$ - variável normal central reduzida correspondente à probabilidade de não excedência $(1 - \alpha)$.

Os coeficientes de variação foram calculados a partir do desvio padrão e da média de distribuição de cada um dos parâmetros analisados, como mostra a Equação 6.4.

$$CV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad 6.4$$

Em que:

CV – Coeficiente de variação

σ_x – Desvio padrão

μ_x – Média de distribuição

Para determinação de $Z_{1-\alpha}$ foi utilizada uma relação padronizada entre esse valor e a fiabilidade $(1-\alpha)$, como consta na Tabela 6.6 (Oliveira & Sperling, 2008; Orumieh *et al.*, 2014).

Tabela 6.6 – Probabilidade Cumulativa

Probabilidade cumulativa $(1-\alpha)$ = nível de confiabilidade (%)	$Z_{1-\alpha}$
50	0,000
60	0,253
70	0,525
80	0,842
90	1,282
95	1,645
98	2,054
99	2,326

Os resultados obtidos em termos de coeficiente de variação e de fiabilidade são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Coeficientes de variação e de confiabilidade

VARIÁVEL	CV	Z_{1-α}	CDC
<i>E. coli</i>	0,87	1,645	0,38
Ovo de Geohelminto	-	-	-
Condutividade Elétrica	0,09	1,645	0,87
pH	0,03	1,645	0,96
Razão de Adsorção de Sódio	0,28	1,645	0,66
Temperatura	0,06	1,645	0,91

Foram calculados CDC para nível de fiabilidade de 95%, valor adequado ao estudo de ETAR (Oliveira, 2006). A partir do CDC e das metas de qualidade para uso de águas residuárias, foram calculadas as concentrações médias de projeto para cada um dos parâmetros atingir os limites estabelecidos na legislação, conforme Equação 6.5.

$$M_x = CDC \cdot X_s \quad 6.5$$

Em que:

M_x – Concentração média do constituinte

CDC – Coeficiente de confiabilidade

X_s – Meta de qualidade fixada pela legislação

De posse dos valores das concentrações nos efluentes e dos coeficientes de variação, foi calculado o percentual esperado de cumprimento das metas adotadas. Para os valores de Z_(1-α) resultantes, conforme Equação 6.6, foram obtidos os valores correspondentes à probabilidade cumulativa da distribuição normal padronizada (distribuição Z). Esses valores foram determinados por meio da função DIST.NORM.P do Excel, e são equivalentes ao percentual de atendimento alcançado.

$$Z_{1-\alpha} = \frac{\ln(X_s) - [\ln(\mu) - 0,5 \cdot \ln(CV^2 + 1)]}{\sqrt{\ln(CV^2 + 1)}} \quad 6.6$$

Dessa forma, a análise da fiabilidade dos resultados da ETAR de Aquiraz foi realizada por meio dos coeficientes de fiabilidade para uma probabilidade de falha de 5% das concentrações de projeto ou metas operacionais e por meio dos percentuais esperados de cumprimento dos padrões estabelecidos.

Os resultados encontram-se nas Tabelas 6.8 a 6.13, que apresentam os percentuais esperados de cumprimento dos padrões estabelecidos para cada uma das variáveis do banco de dados (Anexo 3) e para cada uma das modalidades de reutilização de água da Resolução COEMA Nº 02/2017.

Reutilização para fins urbanos

De acordo com a Tabela 6.8, a ETAR de Aquiraz, para reutilização com fins urbanos, deverá conduzir ao valor médio de 1.923,67 NMP/100 mL de *E.coli* na água residual tratada para que, com a variabilidade inerente a essa estação, 95% dos dados estejam abaixo de 5.000 NMP/100 mL. Da mesma forma, a condutividade elétrica da água produzida por essa estação deverá ter um valor médio de 2.607,51 μ S/cm, para que 95% dos dados estejam abaixo de 3.000 μ S/cm e o pH deverá ser, em média, 8,15 para que 95% dos dados estejam abaixo de 8,5. As variáveis RAS e Temperatura não possuem padrão para a finalidade de reutilização para fins urbanos. Quanto ao ovo de geohelminto, como todos os resultados foram ND (não detectado), conclui-se que a ETAR em estudo consegue produzir uma água dentro do padrão requerido para essa variável e para essa finalidade.

Tabela 6.8 – Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins urbanos, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.

VARIÁVEL	UNIDADE	X_s	M_x	$Z_{1-\alpha}$ Calculado	Atendimento esperado %
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	5.000	1.923,67	3,40	99,97
Ovo de Geohelminto	Ovo/L	1	-	-	-
Condutividade Elétrica	μ S/cm	3.000	2.607,51	11,85	100,00
pH		8,5	8,15	3,32	99,95
Razão de Adsorção de Sódio	$(\text{mmolcL}^{-1})^{1/2}$	-	-	-	-
Temperatura	°C	-	-	-	-

Assim, considerando o percentual de atendimento esperado, a ETAR de Aquiraz já produz uma água apta para reutilização em fins urbanos (isto é, para lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate de incêndio na área urbana).

Reutilização para fins de irrigação paisagística

De acordo com a Tabela 6.9, a ETAR de Aquiraz, para reutilização com fins de irrigação paisagística, deverá conduzir ao valor médio de 384,73 NMP/100 mL de *E. coli* na água residual tratada para que, com a variabilidade inerente a essa estação, 95% dos dados estejam abaixo de 1.000 NMP/100 mL. Da mesma forma, a condutividade elétrica da água produzida por essa estação deverá ter um valor médio de 2.607,51 μ S/cm, para que 95% dos dados estejam abaixo de 3.000 μ S/cm e o pH deverá ser, em média, 8,15 para que 95% dos dados estejam abaixo de 8,5. As variáveis RAS e Temperatura não possuem padrão para essa finalidade de reutilização. Quanto ao ovo de geohelminto, como todos os resultados foram ND (não detectado), conclui-se que a ETAR em estudo consegue produzir uma água dentro do padrão requerido para essa variável e para essa finalidade.

Tabela 6.9 – Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins de irrigação paisagística, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.

VARIÁVEL	UNIDADE	X_s	M_x	$Z_{1-\alpha}$ Calculado	Atendimento esperado %
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	1.000	384,73	1,27	89,75
Ovo de Geohelminto	Ovo/L	1	-	-	-
Condutividade Elétrica	μ S/cm	3.000	2.607,51	11,85	100,00
pH		8,5	8,15	3,32	99,95
Razão de Adsorção de Sódio	$(\text{mmolcL}^{-1})^{1/2}$	-	-	-	-
Temperatura	°C	-	-	-	-

Assim, considerando o percentual de atendimento esperado, a ETAR de Aquiraz já produz uma água apta para fins de irrigação paisagística.

Reutilização para fins ambientais

De acordo com a Tabela 6.10, a ETAR de Aquiraz, para reutilização com fins ambientais, deverá conduzir ao valor médio de 3.847,35 NMP/100 mL de *E. coli* na água residual tratada para que, com a variabilidade inerente a essa estação, 95% dos dados estejam abaixo de 10.000 NMP/100 mL. Da mesma forma, a condutividade elétrica da água produzida por essa estação deverá ter um valor médio de 2.607,51

$\mu\text{S}/\text{cm}$, para que 95% dos dados estejam abaixo de 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o pH deverá ser, em média, 8,15 para que 95% dos dados estejam abaixo de 8,5. As variáveis RAS e Temperatura não possuem padrão para essa finalidade de reutilização. Quanto ao ovo de geohelminto, como todos os resultados foram ND (não detectado), conclui-se que a ETAR em estudo consegue produzir uma água dentro do padrão requerido para essa variável e para essa finalidade.

Tabela 6.10 – Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins ambientais, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.

VARIÁVEL	UNIDADE	X_s	M_x	$Z_{1-\alpha}$ Calculado	Atendimento esperado %
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	10.000	3.847,35	4,33	100,00
Ovo de Geohelminto	Ovo/L	1	-	-	-
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	3.000	2.607,51	11,85	100,00
pH		8,5	8,15	3,32	99,95
Razão de Adsorção de Sódio	$(\text{mmolcL}^{-1})^{1/2}$	-	-	-	-
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	-	-	-	-

Assim, considerando o percentual de atendimento esperado, a ETAR de Aquiraz já produz uma água apta para fins ambientais.

Reutilização para fins de aquicultura

De acordo com a Tabela 6.11, a ETAR de Aquiraz, para reutilização na aquicultura, deverá conduzir ao valor médio de 384,73 NMP/100 mL de *E. coli* na água residual tratada para que, com a variabilidade inerente a essa estação, 95% dos dados estejam abaixo de 1.000 NMP/100 mL. Da mesma forma, a condutividade elétrica da água produzida por essa estação deverá ter um valor médio de 2.607,51 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para que 95% dos dados estejam abaixo de 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o pH deverá ser, em média, 7,67 para que 95% dos dados estejam abaixo de 8,0 e a temperatura deverá ter um valor médio de 36,60 $^{\circ}\text{C}$ para que 95% dos dados estejam abaixo de 40 $^{\circ}\text{C}$. A variável RAS não possui padrão para essa finalidade de reutilização. Quanto ao ovo de geohelminto, como todos os resultados foram ND (não detectado), conclui-se que a ETAR em estudo consegue produzir uma água dentro do padrão requerido para essa variável e para essa finalidade.

Tabela 6.11 – Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização na aquicultura, conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.

VARIÁVEL	UNIDADE	X _s	M _x	Z _{1-α} Calculado	Atendimento esperado %
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	1.000	384,73	1,27	89,75
Ovo de Geohelminto	Ovo/L	ND	-	-	-
Condutividade Elétrica	µS/cm	3.000	2.607,51	11,85	100,00
pH		8,0	7,67	0,95	82,93
Razão de Adsorção de Sódio	(mmolcL ⁻¹) ^{1/2}	-	-	-	-
Temperatura	°C	40	36,60	5,71	100,00

Legenda: ND = não detectado

Assim, considerando o percentual de atendimento esperado, a ETAR de Aquiraz já produz uma água apta para fins de aquicultura.

Reutilização para fins agrícolas (culturas consumidas cruas)

De acordo com a Tabela 7.12, a ETAR de Aquiraz, para reutilização com fins agrícolas (culturas consumidas cruas), deverá conduzir ao valor médio de 2.607,51 µS/cm de Condutividade Elétrica na água residual tratada para que, com a variabilidade inerente a essa estação, 95% dos dados estejam abaixo de 3.000 NMP/100 mL. Da mesma forma, o pH deverá ser, em média, 8,15 para que 95% dos dados estejam abaixo de 8,5. Quanto a Razão de Adsorção de Sódio, o percentual de atendimento esperado foi muito baixo (1,92%), indicando que a ETAR de Aquiraz não produz atualmente uma água com uma RAS dentro do padrão requerido para irrigação de culturas consumidas cruas. Da mesma forma, a água produzida também não atende ao padrão requerido para *E. coli*, pois em todas as coletas foram detectadas essa variável. Quanto ao ovo de geohelminto, como todos os resultados foram ND (não detectado), não constitui um problema.

Tabela 6.12 – Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins agrícolas (culturas consumidas cruas*), conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.

VARIÁVEL	UNIDADE	X _s	M _x	Z _{1-α} Calculado	Atendimento esperado %
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	ND	-	-	-
Ovo de Geohelminto	Ovo/L	ND	-	-	-
Condutividade Elétrica	µS/cm	3.000	2.607,51	11,85	100,00
pH		8,5	8,15	3,32	99,95
Razão de Adsorção de Sódio	(mmolcL ⁻¹) ^{1/2}	15	9,90	-2,07	1,92
Temperatura	°C	-	-	-	-

Legenda: ND = não detectado; *parte consumida tem contato com a água de irrigação

Logo, por essa tabela e pelos dados do Anexo 3, observa-se que não é possível a reutilização para fins de irrigação de culturas consumidas cruas porque em todos os monitoramentos foi detectada *E. coli*, cuja presença não é permitida para essa finalidade, para além do baixo percentual de atendimento esperado para a RAS. Nessa situação, avalia-se a implantação de barreiras e realiza-se a análise de risco para saber se é possível a não satisfação integral dos valores constantes nos normativos que estabelecem a qualidade que a água deve ter para ser reutilizada nessa finalidade. A análise de risco consta na seção 6.6.5 desta tese.

Reutilização para fins agrícolas (demais culturas)

De acordo com a Tabela 6.13, a ETAR de Aquiraz, para reutilização com fins agrícolas (demais culturas), deverá conduzir ao valor médio de 384,73 NMP/100 mL de *E. coli* na água residual tratada para que, com a variabilidade inerente a essa estação, 95% dos dados estejam abaixo de 1.000 NMP/100 mL. Da mesma forma, a condutividade elétrica da água produzida por essa estação deverá ter um valor médio de 2.607,51 µS/cm, para que 95% dos dados estejam abaixo de 3.000 µS/cm e o pH deverá ser, em média, 8,15 para que 95% dos dados estejam abaixo de 8,5. Quanto ao ovo de geohelminto, como todos os resultados foram ND (não detectado), conclui-se que a ETAR em estudo consegue produzir uma água dentro do padrão requerido para essa variável e para essa finalidade. Quanto a Razão de Adsorção de Sódio, contudo, o percentual de atendimento esperado foi muito baixo (1,92%), indicando

que a ETAR de Aquiraz atualmente não produz uma água com uma RAS dentro do padrão requerido para irrigação de culturas não consumidas cruas.

Tabela 6.13 – Percentual de atendimento alcançado relativo ao padrão requerido para reutilização para fins agrícolas (demais culturas), conforme Resolução COEMA Nº 02/2017.

VARIÁVEL	UNIDADE	X _s	M _x	Z _{1-α} Calculado	Atendimento esperado %
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	1.000	384,73	1,27	89,75
Ovo de Geohelminto	Ovo/L	1	-	-	-
Condutividade Elétrica	µS/cm	3.000	2.607,51	11,85	100,00
pH		8,5	8,15	3,32	99,95
Razão de Adsorção de Sódio	(mmolcL ⁻¹) ^{1/2}	15	9,90	-2,07	1,92
Temperatura	°C	-	-	-	-

Nessa situação, avalia-se a implantação de barreiras e realiza-se a análise de risco para saber se é possível a não satisfação integral dos valores constantes nos normativos que estabelecem a qualidade que a água deve ter para ser reutilizada nessa finalidade, conforme seção 6.6.5.

6.6.5 Identificação e avaliação do risco

Como a ETAR de Aquiraz, nas atuais condições, não produz uma água apta para reutilização para fins de irrigação na agricultura, nos termos da Resolução COEMA Nº 02/2017, avaliou-se a implementação de medidas com base na conjugação de múltiplas barreiras para obtenção de efeito multibarreira, de modo a permitir a utilização de uma água de menor qualidade (água cuja qualidade está fora do padrão estabelecido na Resolução COEMA Nº 02/2017, no caso de reutilização praticada no Ceará) ao nível do produtor (ETAR), para um uso mais exigente ao nível do utilizador. As medidas de prevenção e controle ao nível do utilizador devem permitir alcançar um valor de risco menor, compatível ou equivalente à aplicação de um normativo mais exigente (barreira equivalente). Deve-se garantir que a qualidade da água seja mantida durante o uso para a finalidade proposta.

Embora a Resolução COEMA Nº 02/2017 não adote uma abordagem do tipo “adequação ao fim a que se destina” (“fit-for-purpose” na linguagem anglo-

saxônica), essa abordagem foi utilizada na presente tese com o fim de verificar o risco da utilização da água produzida na ETAR de Aquiraz para fins de agricultura e assim poder sugerir uma atualização dessa legislação.

Para classificar o risco, deve-se avaliar a perigosidade e a eficiência das barreiras a serem adotadas, de acordo com a Tabela 3.10. Apenas com uma avaliação de Baixo Risco se deverá abrir a possibilidade da não satisfação integral dos valores constantes nos normativos que estabelecem a qualidade que a água deve ter para ser reutilizada, conforme decisão excepcional do órgão licenciador.

Avaliação da perigosidade

Ao verificar a perigosidade, os perigos associados ao uso dessa água para irrigação de culturas referem-se à exposição de pessoas e animais às culturas irrigadas, nomeadamente ao desenvolvimento de doenças, e ao método de irrigação utilizado.

A água produzida na ETAR de Aquiraz, apresenta, nas atuais condições, parâmetros em desacordo com a legislação vigente sobre reutilização para irrigação de culturas no Estado do Ceará: *E. coli* e RAS. Para saber quais as barreiras que podem ser aplicadas é necessário conhecer quais os efeitos negativos que esses parâmetros podem causar no ambiente e na saúde pública ou animal.

Quanto aos parâmetros microbiológicos, a alta concentração desses elementos pode causar doenças no homem e em animais. Já a elevada concentração de RAS pode causar a redução da permeabilidade do solo e toxicidade das culturas irrigadas.

Dito isso, passa-se a analisar as características da área onde ocorrerá a irrigação. A título exemplificativo, sugere-se a irrigação de Capim Tifton, gramínea do gênero *Cynodon*, desenvolvida com o objetivo de alta produtividade e qualidade forrageira, uma ótima opção para pastejo e produção de feno. O tifton pode ser cultivado em região onde há uma estação seca durante o ano, tem valor econômico, visto que pode ser utilizado para alimentação animal, é de ciclo perene e é tolerante a salinidade (Silva, 2013).

A escolha dessa cultura como exemplo para análise do risco da irrigação com a água produzida na ETAR de Aquiraz também deve-se ao fato de que nas

proximidades da área da ETAR existe uma fazenda de cavalo que pode se beneficiar da produção do feno.

Propõe-se, assim, para reduzir custos com tubulação, a irrigação de capim tifton na área próxima da ETAR. De acordo com Silva (2000), os níveis estáticos do lençol freático nessa área possuem uma profundidade média de 10 metros, solo do tipo arenoso, não fraturado e uma área plana, sem muita declividade. Em face dessas características, de acordo com a Tabela 3.7, observa-se que algumas barreiras já são existentes, tais como: (1) não aplicar em solos argilosos e fraturados; (2) não aplicar em superfícies de terreno com inclinações superiores a 8%; (3) não aplicar em solos onde o nível freático se encontra a profundidades inferiores a 3 metros. Outras barreiras podem ainda ser implementadas, tais como: (4) realizar o transporte em tubulação enterrada; (5) restringir o acesso ao local da utilização; (6) evitar sistemas de irrigação por aspersão; (7) utilizar coberturas com material plástico resistente ao sol para separar o solo das plantas em sistemas de irrigaçãogota-a-gota; (8) suspender a irrigação em período adequado, antes da colheita. A aplicação dessas barreiras reduz o risco para o ambiente e para a saúde pública.

Em face das características da área e da cultura a ser irrigada, passa-se a avaliar a perigosidade, de acordo com a Tabela 3.9. O perigo da utilização da água produzida na ETAR de Aquiraz, nas atuais condições, conforme já mencionado anteriormente, está relacionada com doenças no homem e em animais e a redução da permeabilidade do solo e toxicidade das culturas. Não há evidências desse perigo ter ocorrido no passado e a vulnerabilidade pode ser considerada baixa, pois o nível médio do lençol freático é de 10 metros, o solo não é fraturado e não possui alta declividade, sendo ainda que o capim tifton é tolerante a salinidade. Logo, pela Tabela 3.9, a perigosidade é considerada Baixa.

Determinação do número de barreiras-equivalentes

Passa-se agora a definir o número de barreiras-equivalente, de acordo com a Tabela 3.8. Quando a quantidade de barreiras na Tabela 3.8 era maior que 1, optou-se por um valor intermediário.

Considerando que o capim tifton é uma cultura de crescimento lento (Pereira *et al.*, 2012), propõe-se a irrigaçãogota-a-gota (Nº de barreira-equivalente = 1). Propõe-se coberturas resistentes ao sol (Nº de barreira-equivalente = 1,5),

secagem da cultura ao sol antes da colheita (Nº de barreira-equivalente = 1,5), cessação da irrigação antes da colheita (Nº de barreira-equivalente = 1) e restrição de acesso de pessoas e animais, pelo menos 5 dias após a irrigação (Nº de barreira-equivalente = 1,5). Assim, considerando cumulativamente essas barreiras, o número de barreiras-equivalente é $1 \times 1,5 \times 1,5 \times 1 \times 1,5 = 3,37$.

Se considerarmos o número máximo de barreiras-equivalentes possível com as barreiras escolhidas, a eficiência das barreiras seria baixa para um nº de barreiras-equivalente menor que 1, média para um nº de barreiras-equivalentes igual a 1 ou 2, alta para um nº de barreiras-equivalente maior que 2 e menor ou igual a 8 e muito alta para um nº de barreiras-equivalente maior ou igual a 8. Como o número de barreiras-equivalentes foi 3,37, é considerada uma eficiência alta.

Classificação do risco

Pelo exposto, como a perigosidade é baixa e a eficiência das barreiras alta, o risco é classificado como baixo, conforme Tabela 3.10, podendo-se abrir a possibilidade, nessas condições, da utilização da água residual tratada na ETAR de Aquiraz para irrigação de culturas não consumidas cruas.

Para culturas consumidas cruas, como o padrão para *E. coli* é não detectado, a aplicação de barreiras não é aplicável. Contudo, em locais onde a legislação for menos restritiva e permitir a presença de *E. Coli* em concentração até 1.000 NMP/100 mL (padrão da Resolução COEMA Nº 02/2017 para culturas não consumidas cruas), a análise de risco é passível de ser realizada.

6.7 INQUÉRITO SOCIAL

Para perceber o grau de conhecimento e aceitação da população de Aquiraz relativamente à reutilização de água residual tratada para as finalidades propostas na Resolução COEMA Nº 02/2017, foi realizado um questionário social que visou saber qual o nível de conhecimento que o respondente tinha sobre o tema e para que finalidades ele concordava com a utilização de água de menor qualidade.

Em relação a faixa etária dos respondentes, das 40 respostas obtidas, 25% estavam entre 18 e 24 anos, 15% entre 24 e 32 anos, 25% entre 33 e 45 anos e 35% entre 46 e 55 anos, conforme pode ser visto na Figura 6.19.

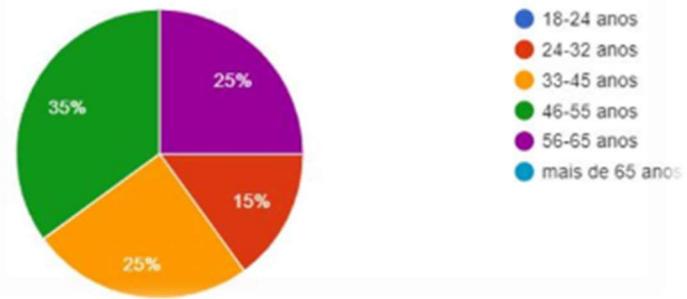


Figura 6.19 – Faixa etária dos respondentes

Quanto ao nível de conhecimento sobre o que significa reutilização de água residual tratada e escassez hídrica e sobre a relação “crescimento populacional urbano x disponibilidade hídrica”, as Figuras 6.20 a 6.25 apresentam os resultados obtidos, sendo que 77,5% dos 40 respondentes afirmam ter algum conhecimento sobre o tema, 70% sabe acerca do nível de escassez hídrica no Estado do Ceará, 67,5% afirmaram que a cidade de Aquiraz tem enfrentado problemas com a falta de água nos últimos 5-10 anos e 92,5% tem alguma preocupação quanto a relação crescimento populacional urbano versus disponibilidade de recursos hídricos. Conforme Figura 6.25, o abastecimento humano e a agricultura foram considerados como os setores da economia que mais têm sofrido com a redução da disponibilidade hídrica (67,5% e 27,5%, respectivamente).

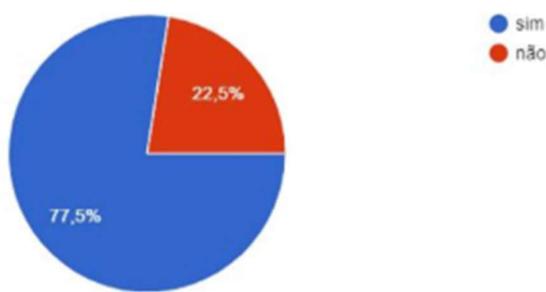


Figura 6.20 – Percentual com conhecimento sobre o tema “reutilização de água residual tratada”



Figura 6.21 – Percentual com conhecimento sobre o significado de escassez hídrica

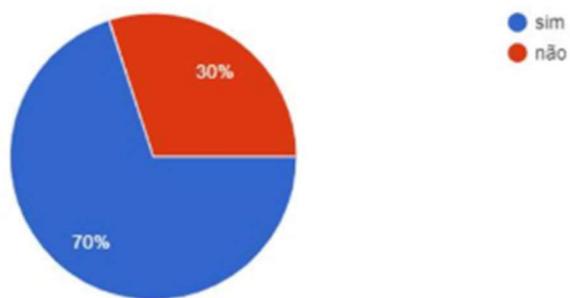


Figura 6.22 – Percentual com conhecimento sobre o nível de escassez hídrica no Estado do Ceará

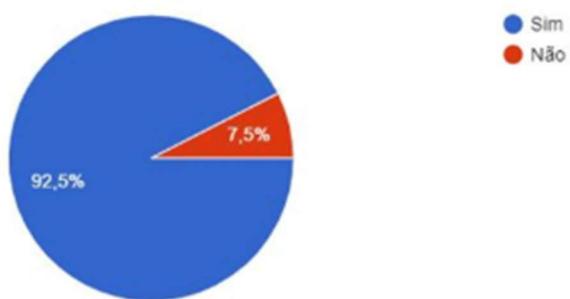


Figura 6.23 – Percentual com alguma preocupação quanto a relação “crescimento populacional urbano x disponibilidade hídrica”

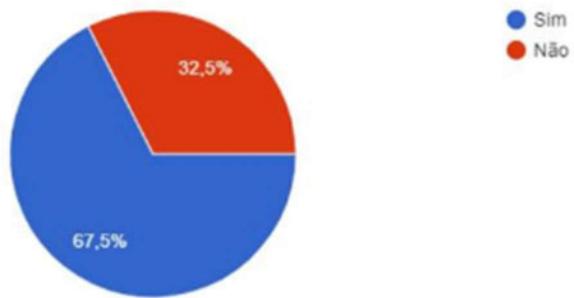


Figura 6.24 – Percentual que afirmaram que a cidade de Aquiraz tem enfrentado crise hídrica nos últimos 5-10 anos

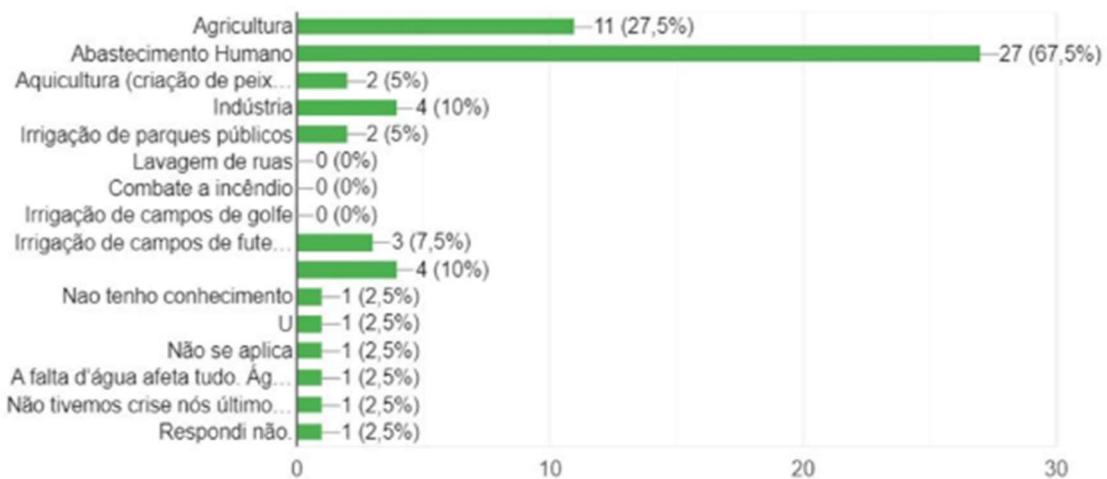


Figura 6.25 – Percentual do setor econômico com crise hídrica nos últimos 5-10 anos

Na seção sobre a aceitação da reutilização de água residual tratada para alguma finalidade, 97,5% dos 40 respondentes concordam em utilizar essa matéria-prima, dos quais 82,5% concordam com a utilização para fins urbanos, 52,5% para fins agrícolas, 57,5% para fins ambientais, 47,5% para fins industriais e 35% para fins de aquicultura, de acordo com as Figuras 6.26 e 6.27.

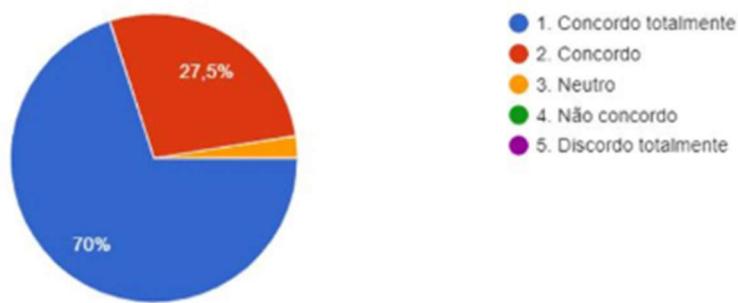


Figura 6.26 – Percentual de concordância com o uso de água residual tratada para alguma finalidade

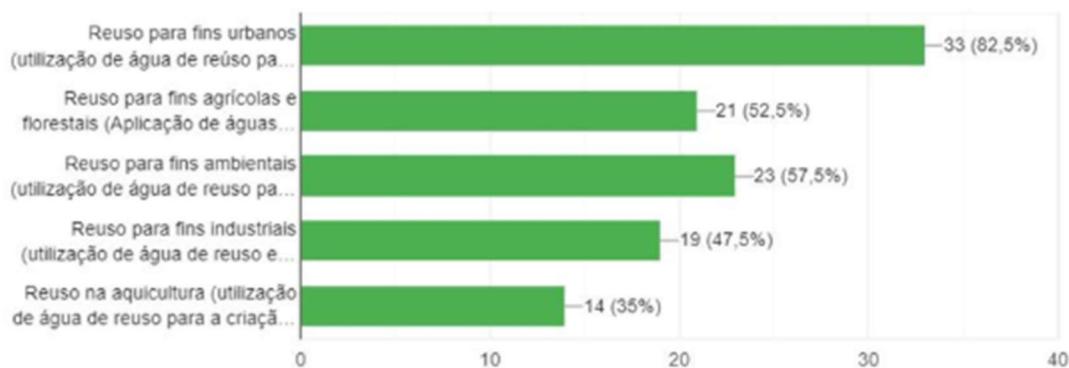


Figura 6.27 – Percentual de concordância com o uso de água residual tratada para cada finalidade permitida pela Resolução COEMA Nº 02/2017

Quando perguntado se concordava com a utilização de água residual tratada para o cultivo de alimentos, produção de peixe, abastecimento de lagos artificiais, irrigação de jardins, parques e campos de esporte e para o combate a incêndio, os resultados mostram que mais de 50% dos 40 respondentes concordavam, conforme Figuras 6.28 a 6.32.

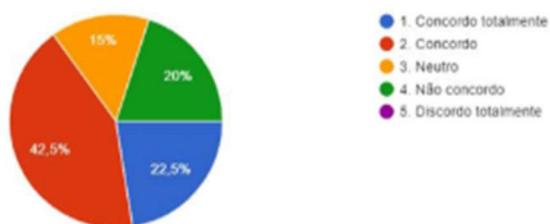


Figura 6.28 – Percentual que concorda com o cultivo de alimento com água residual tratada

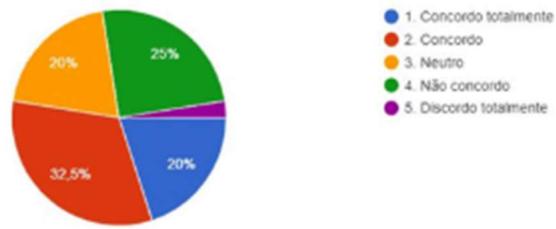


Figura 6.29 – Percentual que concorda com o cultivo de peixe com água residual tratada

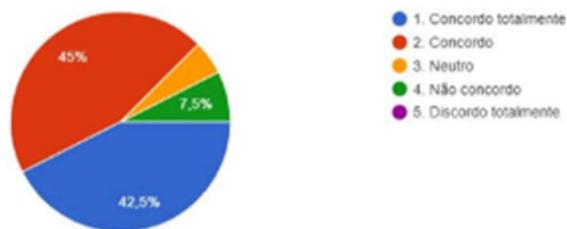


Figura 6.30 – Percentual que concorda com o abastecimento de lago artificial com água residual tratada

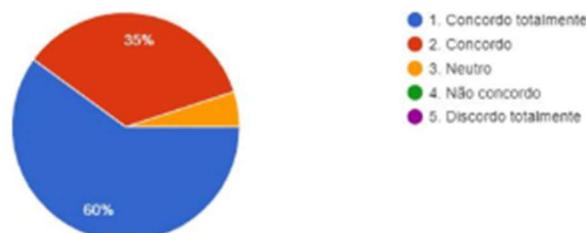


Figura 6.31 – Percentual que concorda com a irrigação de jardins e campos de esporte com água residual tratada

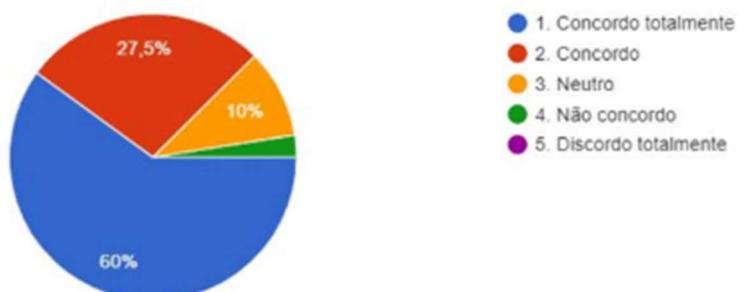


Figura 6.32 – Percentual que concorda com o combate a incêndio com água residual tratada

A partir do questionário social pôde-se inferir que a implementação de um projeto de reutilização de água não enfrentará, em princípio, uma forte oposição da sociedade residente em Aquiraz, que também indicou que o município tem enfrentado problemas com a baixa pluviometria nos últimos 5-10 anos, especialmente para o abastecimento humano, situação que pode amenizar com recurso a reutilização de água, ao reservar água de melhor qualidade para essa finalidade mais nobre.

6.8 ANÁLISE ECONÔMICA

Pelos dados das Tabelas 7.8 a 7.13, observa-se que as atuais possibilidades de reutilização da água residual tratada na ETAR de Aquiraz, considerando o percentual de atendimento à legislação esperado (Resolução COEMA Nº 02/2017) e a aplicação de barreiras-equivalente para obtenção de efeito multibarreira, são: a irrigação de culturas não consumidas cruas, a irrigação urbana, paisagística e ambiental e a aquicultura.

Como dito na seção 6.6.5, para efeitos exemplificativos, considerou-se a implantação de um projeto de reutilização agrícola na área próxima da ETAR.

A Figura 6.33 apresenta um esquema de um projeto de irrigação na área da ETAR de Aquiraz, com uma adutora de 2 polegadas de diâmetro para captar a água residual tratada na última lagoa de maturação, uma caixa de areia, dois conjuntos motor bomba com potência de 5hp, um reservatório elevado de 3m de altura e com 20 m³ de capacidade e rede de distribuição para as áreas a serem irrigadas.

Cada área a ser irrigada possui 1 ha e cada hectare pode ser irrigado ao longo de 6 horas, por gotejamento, com uma vazão de 8,3 m³/hora. Assim, para irrigar as 5 áreas delimitadas na Figura 6.33 é necessária uma vazão de 249 m³/dia (5 x 6 x 8,3), considerando 6 h por dia de irrigação.

Como só há 1 módulo das lagoas em funcionamento e a vazão média é de 68,62 l/s (cerca de 5.900 m³/dia), conforme Tabela 6.3, a ETAR produz água numa vazão suficiente para a irrigação das áreas propostas.



Figura 6.33 – Projeto de irrigação dentro da área da ETAR de Aquiraz

Na Tabela 6.14 constam os materiais e custos necessários para implantação do projeto proposto. O custo de implantação desse projeto seria de, aproximadamente, R\$ 251.267,45 reais (US\$ 45.759,04 dólares), um custo considerado baixo face aos benefícios econômicos e ambientais advindos, como a proteção do Rio Pacoti, que deixaria de receber esse aporte de carga poluidora, aumento da produtividade agrícola, sem uso de fertilizante comercial, visto que a água residual tratada possui substâncias que proporcionam elevação do rendimento da colheita e maior reserva de água de melhor qualidade para abastecimento humano, visto que Aquiraz já tem sofrido com escassez hídrica.

Tabela 6.14 – Materiais e valores para irrigação por gotejamento

ITEM	QUANTIDADE	VALOR (R\$)	VALOR (R\$) TOTAL
Bomba 5hp trifásica	2	4.098,19	8.196,4
Tubo de 2 polegadas	355,53 m	44,19/6 metros	2.618,50
Conjunto irrigação gotejamento	5	10.955,99	54.779,95
Reservatório Elevado (serviço e material)	1	185.672,60	185.672,60
TOTAL		R\$ 251.267,45 (US\$ 45.759,04)	

Quanto aos custos de operação e manutenção, uma vez que a ETAR já está em funcionamento e não será necessário acrescentar outras etapas de tratamento, esses custos se referem ao pagamento de funcionário para operar a ETAR (custo já existente) e pagamento de energia elétrica para funcionamento dos conjuntos motor bomba.

Solicitou-se à CAGECE dados de custo de operação e manutenção da ETAR de Aquiraz, mas a informação foi negada com base no Artigo 24, item I, do Decreto Estadual Nº 31.199, de 30 de abril de 2013, que permite a não disponibilização das informações quando estas forem classificadas como sigilosas. No caso específico, alegou-se tratar-se de informações estratégicas para o negócio da empresa. Acrescentou ainda que a coleta de dados é feita por município e não individualiza os custos na ETAR e que os dados de custo referiam, em conjunto, a abastecimento de água e esgoto, não existindo a informação apenas para esgoto.

Quanto ao preço da água residual tratada a ser utilizada na irrigação, sabe-se que deve ser competitivo com o valor da água bruta cobrada pela COGERH (Duong & Saphores, 2015; Mancuso *et al.*; 2021). Atualmente, para irrigação com adução própria entre 1.440 a 18.999 m³/mês, o preço da água é R\$ 2,28/1.000 m³ (US\$ 0,51/1.000 m³), um valor relativamente baixo, mas dentro da gama recomendada por Mancuso *et al* (2021) para o preço final da água reutilizada para fins não potáveis, conforme Tabela 4.3 (0,25 – 1,60 US\$/m³).

Geralmente, reutilizar a água é mais dispendioso do que captar água de uma origem natural de água doce, mas é mais barata do que a dessalinização da água do mar ou a construção de novas barragens. Como, normalmente, a água de origem natural já está sendo utilizada, o custo da reutilização da água deve ser comparado com o custo de qualquer nova origem de água disponível. Os custos de reutilização

da água variam muito de um lugar para outro, dependendo das características físicas do local, requisitos de qualidade da água, métodos de tratamento, necessidades do sistema de distribuição, custos de energia, taxas de juros, incentivos e muitos outros fatores.

É importante ressaltar, conforme Arborea *et al.*, (2017), que as águas residuais recuperadas são uma fonte de água disponível ao longo de todo o ano, garantindo o suprimento de água para a finalidade proposta e, portanto, considera-se o valor econômico de garantir o suprimento de água para uma determinada necessidade, especialmente em condições de escassez.

Outro fator que deve ser levado em consideração na análise econômica é o equivalente populacional (PE), ou seja, o percentual de cobertura de coleta e tratamento de esgoto, pois quanto maior esse percentual, menor será, teoricamente, o custo médio por m^3 de água residual tratada (Arborea *et al.*, 2017).

As Figura 6.34 a 6.39 apresentam imagens das áreas próximas dos órgãos da ETAR sugeridas para irrigação e zonas anexas onde já existem algumas plantações.

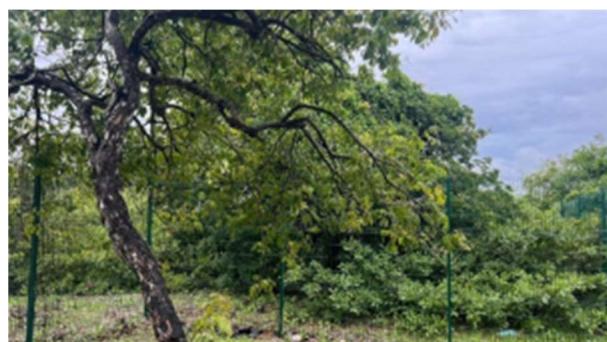


Figura 6.34 – Vista das áreas propostas para irrigação na zona da ETAR



Figura 6.35 – Vista das áreas propostas para irrigação na zona da ETAR



Figura 6.36 – Vista das áreas propostas para irrigação na zona da ETAR



Figura 6.37 – Área próxima da ETAR com plantação de coqueiros



Figura 6.38 – Fazenda de cavalos, próxima da ETAR



Figura 6.39 – Área próxima da ETAR com plantação de bananas

6.9 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE K DOS PARÂMETROS

6.9.1 Indicador técnico

Segurança e resiliência da ETAR (K₁₁)

De acordo com os coeficientes de fiabilidade calculados, a ETAR de Aquiraz mostrou-se fiável para a maioria das finalidades de reutilização de água residual tratada permitidas pela Resolução COEMA Nº 02/2017, com exceção da irrigação na agricultura.

Para a maioria das finalidades, o percentual de fiabilidade foi superior a 80%. Assim, de acordo com a Tabela 5.6, o valor de K é 1 (segurança e resiliência da ETAR).

Complexidade do transporte (K₁₂)

Em Aquiraz ainda não há uma infraestrutura de armazenamento e transporte da água residual tratada. Para efeitos exemplificativos, foi desenvolvido um projeto de reutilização para irrigação dentro da área junto da ETAR, com uma distância entre a área de produção e a área de utilização inferior a 3km. Assim, de acordo com a Tabela 5.5, o valor de K é 1.

Existência de legislação (K₁₃)

Uma vez que o município de Aquiraz não possui legislação que trate da reutilização de água residual tratada, considera-se a legislação estadual (Resolução COEMA Nº 02/2017). Logo, pela Tabela 5.7, o valor de K é 0,8.

6.9.2 Indicador ambiental

Risco para saúde (K₃₁)

De acordo com a Resolução COEMA Nº 02/2017 e com a aplicação de barreiras-equivalente para obtenção de efeito multibarreira, a ETAR de Aquiraz produz uma água adequada e segura para as finalidades de reutilização da referida resolução, com uma classificação de risco baixo. Assim, de acordo com a Tabela 5.11, o valor de K é 1.

Consumo de energia (K₃₂)

O tratamento na ETAR de Aquiraz baseia-se em lagoas de estabilização, que consiste em um tratamento biológico natural, sem consumo de produtos químicos e energia. Contudo, considerando o acréscimo de bombeamento para a área da reutilização, de acordo com a Tabela 5.12, considera-se o consumo de energia na área de produção Baixo Médio, com valor de K de 0,8.

Risco para o ambiente (K₃₃)

Considerando que com a prática da reutilização de água em Aquiraz haverá uma redução do lançamento do efluente tratado no Rio Pacoti e a classificação de risco baixo na avaliação de risco, pela Tabela 5.13 o valor de K é 1.

6.9.3 Indicador social

Grau de aceitação (K₂₁)

De acordo com o inquérito social aplicado, 52,5% concordam com a utilização de água residual tratada para irrigação agrícola. Assim, para essa finalidade, conforme Tabela 5.8, o valor de K é 0,6.

Grau de necessidade (K₂₂)

De acordo com IPECE (2023), a cidade de Aquiraz foi classificada, em 2023, na categoria 3, com média vulnerabilidade a partir do Índice Municipal de Alerta (IMA). Assim, pela Tabela 5.9, o valor de K é 0,50.

Universalização da coleta e tratamento de esgoto (K₂₃)

Segundo IPECE (2022), a taxa de cobertura de esgotamento sanitário em Aquiraz, em 2022, era de 44,3%. Logo, de acordo com a Tabela 5.10, o valor de K é 0,6.

6.9.4 Indicador econômico

Investimento necessário (K₄₁)

O investimento necessário para implantação da reutilização de água em Aquiraz está relacionado com a implantação da infraestrutura de armazenamento e transporte, ainda inexistente. Na estimativa desenvolvida, de forma simplificada, na presente tese, o investimento previsto foi de R\$ 251.270 reais (US\$ 45.760 dólares). Conforme Tabela 5.14, classifica-se esse investimento como de Baixo Médio. Logo, o K é igual a 0,8.

Encargos de operação e manutenção (K₄₂)

Como a ETAR é do tipo lagoa de estabilização, a operação e manutenção é simples, pois o tratamento é do tipo biológico natural, sem necessidade de profissional especializado para operação, sem altos custos com energia e sem produtos químicos, mas com o acréscimo de consumo de energia elétrica com o bombeamento para as áreas de irrigação. Assim, de acordo com a Tabela 5.15, o valor de K é 0,8, classificado como de Baixo Médio.

Benefícios econômicos (K₄₃)

Em termos de produtividade, não há dados reais porque não foram realizados experimentos com a água residual tratada na ETAR de Aquiraz durante o desenvolvimento da presente tese. Contudo, há vários estudos que relatam o aumento da produtividade agrícola quando do uso de água residual tratada. Segundo de Oliveira Marinho *et al* (2014), por exemplo, o uso de água residual tratada na irrigação de eucalipto aumentou a produtividade em 82,9% quando comparada com a irrigação tradicional.

Dessa forma, de acordo com a Tabela 5.16, no presente estudo classificam-se os benefícios econômicos como alto, com valor de K igual a 0,8.

6.10 ÍNDICE DE VIABILIDADE POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO EM AQUIRAZ

Utilizando a equação 5.15 e os valores de K identificados na seção 6.9, obteve-se o índice de viabilidade potencial de reutilização de água em Aquiraz, conforme Tabela 6.15, de 81%, classificado na categoria Muito Alta Viabilidade, de acordo com a Tabela 5.4 (igual ou superior a 81%).

Tabela 6.15 – Índice de Viabilidade Potencial de Reutilização de Água em Aquiraz

INDICADOR	Peso Local C_i	Parâmetros	Peso Local C_{ij}	Peso Global W_{ij}	K_{ij}	$W_{ij} \times K_{ij}$
Técnico	0,354	Complexidade de Transporte	0,340	0,12	1	0,12
		Segurança e Resiliência da ETAR	0,391	0,14	1	0,14
		Existência de Legislação	0,269	0,09	0,8	0,07
Social	0,242	Grau de Aceitação	0,435	0,11	0,6	0,06
		Grau de Necessidade % Coleta e Tratamento de Esgoto	0,332	0,08	0,5	0,04
			0,233	0,06	0,6	0,03
Ambiental	0,132	Risco para Saúde Pública	0,676	0,09	1	0,09
		Consumo de Energia na ETAR	0,130	0,02	0,8	0,01
		Risco para o Ambiente	0,194	0,03	1	0,03
Econômico	0,272	Investimento Necessário	0,373	0,10	0,8	0,08
		Encargos de Operação e Manutenção	0,133	0,04	0,8	0,03
		Benefícios Econômicos	0,494	0,13	0,8	0,11
IVR (%)						81,0%

Realizou novamente a análise de sensibilidade, conforme descrito na seção 6.11 e calculou-se o IVR para Aquiraz com os novos pesos dos indicadores após as variações percentuais da Tabela 6.11. Os resultados constam na Tabela 6.16

onde é possível observar que o valor do Índice de Viabilidade Potencial de Reutilização (IVR) em Aquiraz manteve-se sempre na categoria “muito alta viabilidade”.

Tabela 6.16 – Resultado da análise de sensibilidade para o IVR de Aquiraz

%	TÉCNICO	SOCIAL	AMBIENTAL	ECONÔMICO	IVR
-15%	0,3009	0,2616	0,1433	0,2942	80,80%
-10%	0,3187	0,2549	0,1397	0,2867	81,15%
-5%	0,3364	0,2483	0,1360	0,2793	81,50%
0%	0,3541	0,2417	0,1324	0,2718	81,00%
5%	0,3718	0,2351	0,1288	0,2644	82,21%
10%	0,3895	0,2285	0,1252	0,2569	82,56%
15%	0,4072	0,2218	0,1215	0,2495	82,90%

7.0 SÍNTSE, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA INVESTIGAÇÃO

Esse trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo simplificado do apoio à decisão de reutilização de água, contendo os indicadores e parâmetros relevantes para essa decisão.

De acordo com os resultados apresentados, os indicadores relevantes para uma decisão de reutilização são: Indicador Técnico, Indicador Social, Indicador Ambiental e Indicador Econômico. Quanto aos parâmetros, para cada um desses indicadores foram identificados parâmetros com eles relacionados.

Para o indicador técnico identificou-se a complexidade do transporte (adutoras, reservatórios e distribuição da água residual tratada), a segurança e resiliência da estação de tratamento de água residual tratada (ETAR) e a existência de legislação que apresente a qualidade que a água residual tratada deve apresentar para poder ser reutilizada em um determinado local.

Para o indicador social identificou-se o grau de aceitação do público, o grau de necessidade, relacionado com a crise hídrica local e a taxa de cobertura de coleta e tratamento de esgoto na região onde se pretende a reutilização, uma vez que quanto maior for essa taxa, mais água residual tratada estará disponível para as finalidades possíveis e permitidas, além de indicar um bom índice de desenvolvimento social, pela importância para a saúde pública da condição e grau de universalização do sistema de coleta e tratamento de efluentes.

Para o indicador ambiental identificou-se o risco para saúde pública e para o ambiente, e que está diretamente relacionado com a segurança e resiliência da ETAR. A prática da reutilização permite a reserva de água de boa qualidade para finalidades mais nobres, como o abastecimento humano, e isso também está indiretamente relacionado com o parâmetro risco para o ambiente. O gasto de energia também foi identificado como um parâmetro do indicador ambiental, uma vez que, conforme a tecnologia de tratamento e as distâncias entre a área de produção e a utilização, e altimetria, assim varia o consumo energético. A depender da fonte energética, podem ainda ter lugar emissões de gases com efeito de estufa, com impacto em termos de alterações climáticas.

Para o indicador econômico identificou-se o investimento como um dos seus parâmetros, uma vez que custos de investimentos elevados para implantar o

projeto, pode torná-lo inviável, assim como os custos de operação e manutenção ao longo da vida útil. Ainda, para o indicador econômico, foi considerado o benefício econômico decorrente do incremento da produtividade agrícola.

Quanto aos indicadores e parâmetros identificados na presente tese, é importante mencionar que a lista não é taxativa, ou seja, podem incluir-se outros indicadores e parâmetros, se assim entenderem os especialistas e face aos contextos locais, assumindo-se, contudo, a aplicação do modelo proposto no que respeita à forma para determinação dos respectivos pesos.

A metodologia *Fuzzy AHP* assumida na presente tese mostrou-se viável e prática para a determinação dos pesos dos diversos indicadores e parâmetros. Conforme exemplo e estudo de caso desenvolvido, a análise de sensibilidade mostrou robustez dos resultados e conclusões.

A análise de sensibilidade revelou, para o caso exemplo de reutilização de água, uma diferença significativa entre o peso do indicador técnico e dos demais indicadores, sugerindo que em futuras análises ou decisões, o foco nos indicadores com maior peso pode ser útil na tomada de decisão.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um software para tornar mais rápida a obtenção dos pesos dos indicadores e parâmetros. O software seria alimentado apenas com os julgamentos linguísticos dos especialistas, rodando todas as etapas do método *Fuzzy AHP* internamente e fornecendo os pesos dos indicadores e parâmetros selecionados.

Para validação do modelo proposto, caracterizou-se a cidade de Aquiraz, escolhida como estudo de caso. Com base na realidade local, o Índice de Viabilidade Potencial de Reutilização (IVR) foi de 81%, ou seja, com classificação de “muito alta viabilidade”.

Conforme referido em (Matzenauer, 2003), um modelo de apoio à decisão deste tipo não retrata a “verdade”, nem o pretende, e assim as suas conclusões devem ser encaradas com mais cuidado do que um modelo baseado no paradigma racionalista. Desta forma, é melhor falar em uma recomendação, do que em uma prescrição, já que a solução encontrada pelo modelo não é a única possível, mas apenas uma especialmente bem fundamentada.

No estudo de caso, procedeu-se à avaliação e gestão do risco de reutilização da água em culturas consumidas cruas ou não. Cabe informar que, embora esse estudo tenha sido realizado na tese, a avaliação do risco, por meio da

implantação de barreiras múltiplas para obtenção de efeito multibarreira, não se encontra prevista na legislação pertinente, em vigor no Estado do Ceará (Resolução COEMA Nº 02/2017).

No Estado do Ceará, para que uma água residual tratada possa ser reutilizada, todos os parâmetros referidos na legislação pertinente carecem de ser respeitados. Não prevê a aplicação de barreiras múltiplas para se conseguir um efeito multibarreira. Essa lacuna na legislação cearense permite sugerir a atualização da Resolução COEMA Nº 02/2017, de forma a pode abrir a possibilidade de aplicação de metodologias de avaliação e gestão do risco nesse tipo de projeto, entendendo-se que tal poderia incentivar e aumentar o percentual dessa prática no Estado.

Na introdução, foram levantadas as seguintes 5 questões-chave, que foram sendo respondidas ao longo da tese.

1. Quais são os indicadores e parâmetros relevantes para um modelo de apoio à decisão de reutilização?

Indicadores: Técnico, Social, Ambiental e Econômico

Parâmetros: Complexidade de transporte, Segurança e Resiliência da ETAR, Existência de Legislação, Grau de Aceitação, Grau de Necessidade, Taxa de Cobertura de Coleta e Tratamento de Esgoto, Risco para Saúde Pública, Risco para o Ambiente, Gasto de Energia na ETAR, Investimento Necessário, Custos e Operação e Manutenção e Benefícios Econômicos.

2. Quais os valores aceitáveis para esses parâmetros e indicadores?

No capítulo 4 são apresentados indicadores e parâmetros, e no capítulo 5 a metodologia para atribuição de pesos, para ter em conta no modelo geral de apoio à decisão apresenta os seus pesos. A equação 5.14 resume o modelo de apoio à decisão.

3. Exemplificar a aplicação de modelo de apoio à decisão, incluindo a avaliação de disponibilidades, os consumos e os investimentos e encargos necessários, para um sistema da reutilização da água, num estudo de caso.

Conforme apresentado no Capítulo 7, identificou-se, para a cidade de Aquiraz, a disponibilidade hídrica, as necessidades de água a reutilizar, e estimaram-se os custos associados à reutilização da água.

Por esse estudo é possível concluir pela necessidade de maiores investimentos e incentivos à prática da reutilização de água residual tratada no Brasil, que é o 6º país mais populoso, mas reutiliza de forma planejada, apenas 1,5% dos efluentes. No entanto, a Lei Nº 14.026/2020, novo marco legal do saneamento, destaca a importância da reutilização da água, ao mencioná-la 8 vezes, no âmbito de um planejamento do saneamento eficiente, estruturado e sustentável. Mas considera-se que ainda não teve lugar esse planejamento no Brasil. Ainda não se encontra verdadeiramente incorporada a solução de reutilização de água na gestão de recursos hídricos das bacias e regiões do Brasil.

Identificam-se seguidamente algumas ações sugeridas para o incentivo à reutilização da água e economia circular no Brasil:

- Publicação de leis e regulamentos que abordem a reutilização de efluentes, a fim de trazer segurança jurídica aos investimentos em projetos desta natureza;
- Clareza tributária (uma das dificuldades da reutilização no Brasil é que cada Estado da nação pratica uma tributação diferente. Em alguns Estados cobra-se um determinado imposto e em outros são cobrados outros impostos);
- Criação de incentivos para viabilizar projetos de reutilização da água, como isenção de impostos, IPTU verde etc.;
- Criação de linhas de crédito especiais para o financiamento de projetos de reutilização;
- Linhas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para tratamento de afinação de efluentes, nomeadamente de desinfecção, visando estimular a inovação e reduzir os custos associados à reutilização da água;
- Estabelecer parcerias entre o setor público e o setor privado para incentivar e viabilizar projetos de reutilização, desenvolvendo assim novos modelos de negócio.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Oficina sobre escassez hídrica e racionamento preventivo: a necessária integração entre as políticas de recursos hídricos e de saneamento básico.** Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/allocacao-de-agua/oficina-escassez-hidrica/comar-allocacao-de-agua-e-escassez-hidrica#:~:text=Situação>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

ÁGUA, Instituto Reuso de. **Produção de Dados.** Disponível em: <<https://reusodeagua.org/producao-de-dados/>>. Acesso em: 20 fev. 2024.

ALBERICH, Josep Pinyol *et al.* Upscaling urban recycled water schemes: An analysis of the presence of required governance conditions in the city of Sabadell (Spain). **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 1, 2018.

ALBUQUERQUE, Antonio; FERREIRA, Filipa; MATOS, José Saldanha. **Guia Metodológico para a Definição de Quadro Normativo Aplicável às Águas para Reutilização em Cabo Verde.** [S.I.: S.n.].

ALCOFORADO, M. *et al.* **Alterações climáticas e desenvolvimento urbano - série política de cidades 4.** [S.I.]: Lisboa: Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano, 2009.

ALLEN, M. R. *et al.* Framing and Context. In: MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (Orgs.). **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change,.** [S.I.]: In Press, 2018. p. 49–91.

ALMEIDA, Otávio Álvares de. **Qualidade da Água de Irrigação.** 1^a Edição ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010.

ANDRADE, Edilene Pereira *et al.* Water scarcity in Brazil: part 1—regionalization of the AWARE model characterization factors. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 2342–2358, 2019.

ARBOREA, *et al.* Cost-benefit analysis of wastewater reuse in Puglia, Southern Italy. **Water (Switzerland)**, 9(3), 1–17, 2017.

ANDRADE, Edilene Pereira *et al.* Regionalização de fatores de escassez hídrica em sub-bacias cearenses. **Revista DAE**, v. 68, n. 224, p. 122–134, 2020.

ASANO, Takashi; LEVINE, Audrey D. Wastewater reclamation, recycling and reuse: Past, present, and future. **Water Science and Technology**, v. 33, n. 10–11, p. 1–14, 1996.

BARESEL, *et al.* Municipal wastewater reclamation for non-potable reuse - Environmental assessments based on pilot-plant studies and system modelling. **Water Science and Technology**, 72(9), 1635–1643, 2015.

BARNETT, V.; LEWIS, T. Outliers in statistical data (Vol. 3, No. 1). New York: Wiley, 1994.

BIOTTA, Patrícia; ROSS, Bárbara Zanicotti Leite. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 275–282, 2016.

BIXIO, Davide *et al.* Wastewater reuse in Europe. **Desalination**, v. 187, n. 1–3, p. 89–101, 2006.

BRASIL. 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2019. In Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília: [S.n.].

CAIXETA, Cláudia Elizângela Tolentino. **Avaliação do atual potencial de reúso de água no estado do Ceará e propostas para um sistema de gestão (Tese de Doutorado).** [S.I.]: Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, CE, Brasil, 2010.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. *Journal of Cleaner Production*, 15(16), 1529–1534, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.032>

CARMO, Jorge Manuel Ventura Oliveira e. **Estratégia de Adaptação das ETAR às Alterações Climáticas com Suporte na Simulação Dinâmica.** [S.I.]: Instituto Superior Técnico/Universidade de Lisboa, 2013.

CARR, Richard. Who guidelines for safe wastewater use - More than just numbers. *Irrigation and Drainage*, v. 54, n. SUPPL. 1, p. 103–111, 2005.

CARVALHO, C. B. de. *Estudo de mobilidade de contaminantes no solo e de confiabilidade para avaliar o uso de águas residuárias tratadas em indústrias siderúrgicas.* Dissertação de Mestrado -Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará, 2021.

CORRÊA, É. C. *Construção de um modelo multicritério de apoio ao processo decisório*, 1996.

Decreto-Lei n.º 119/2019, Diário da República nº 159/2019 21 (2019). <https://dre.pt/home/-/dre/124097549/details/maximized>

DE OLIVEIRA MARINHO, Luccas Erickson *et al.* Evaluation of the Productivity of Irrigated Eucalyptus grandis with Reclaimed Wastewater and Effects on Soil. **Water Air Soil Pollution**, 225 (1), 1–7, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1830-8>

DE OLIVEIRA MARINHO, Luccas Erickson *et al.* Application of Reclaimed Wastewater in the Irrigation of Rosebushes. **Water Air Soil Pollution**, v. 224 (9), p. 1–7, 2013.

DIAS, E. M. P da S. *Modelo de apoio à decisão multicritério para seleção de fornecedores de azeite*. Dissertação de Mestrado -Faculdade de Economia - Universidade do Porto, 2015.

DUONG, Kimberly; SAPHORES, Jean-Daniel M. Obstacles to wastewater reuse: an overview. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 3, p. 199–214, 2015.

FELIPE, M. F. et al. Comparação de técnicas de obtenção de sólidos totais dissolvidos nas águas: contribuição para os estudos de desnudação geoquímica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20, 19–33, 2019. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1440>

FERREIRA, Filipa et al. **Plano Estratégico de Reutilização de Água da Cidade de Lisboa**. Lisboa: Águas do Tejo Atlântico, 2019.

FILIPPINI, Roberta Miguel Kiska et al. Perspectivas de redução de emissões de gases de efeito estufa no tratamento de esgoto no estado do Paraná até o ano de 2030. In: 2017.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento, 5^a ed.** Brasília: FUNASA. 545p. Brasília: [S.n.].

GANDRA, Alana. **Atividades econômicas coonsumiram 3,2 trilhões de metros cúbicos de água em 2025.** Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-03/pesquisa-economia-e-familias-usaram-32-trilhoes-m3-de-agua-em-2015>>. Acesso em: 19 jan. 2024.

GIANNOCCARO, G., et al. Assessing reclaimed urban wastewater for reuse in agriculture: Technical and economic concerns for Mediterranean regions. **Water (Switzerland)**, 11(7), 2019. <https://doi.org/10.3390/w11071511>

GODINHO, Fernando Manuel da Silva. **Redução do consumo energético e das emissões de gases com efeito de estufa no tratamento de águas residuais . Um**

roteiro de ação para entidades gestoras. Tese de Doutorado. [S.I.]: Instituto Superior Técnico/Universidade de Lisboa, 2015.

GOELLNER, Emanuelle. Estudo para reúso de Efluentes de Estações de Tratamento de Esgoto na Irrigação. Dissertação de Mestrado. Passo Fundo, Brasil: Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, Brasil, 2010.

GOMES, K. G. A. *Um método multicritério para localização de unidades celulares de intendência da FAB.* Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

GONDHALEKAR, Daphne; AL-AZZAWI, Mohammed; DREWES, Jörg E. Urban Water Reclamation with Resource Recovery as a Cornerstone of Urban Climate Change Resilience. *In: FILHO, W. Leal (Org.). Handbook of Climate Change Resilience.* Munich: Springer International Publishing, 2019. p. 0–22.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Compêndio com resultados do projeto: apoio ao crescimento econômico com redução das desigualdades e sustentabilidade ambiental no Ceará - Programa para resultados (PfoR). Ceará: [S.n.].

HIDALGO, Dolores et al. Development of a multi-function software decision support tool for the promotion of the safe reuse of treated urban wastewater. **Desalination**, v. 215, n. 1–3, p. 90–103, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. Climate change 2017: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press. [S.I.: S.n.].

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New

York: Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: [S.n.].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects — Part 1: The basis of a reuse project for irrigation (ISO 16075-1:2020) (2^a Ed). [S.l.: S.n.].

IPEA. Agenda 2030 ODS-Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. [S.l.: S.n.].

IPECE, I. de P. e E. E. do . *Sistema de Informações geossocioeconômicas do Ceará*. 2022. <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/anuario.xhtml?cid=2>

IPECE, I. de P. e E. E. do C. *Índice municipal de alerta - IMA 2023*. www.ipece.ce.gov.br

JIMÉNEZ CISNEROS, B. E. *et al.* Freshwater resources. In: FIELD, C. B. *et al.* (Orgs.). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. p. 229–269.

LAZAROVA, Valentina *et al.* **Milestones in Water Reuse: The Best Success Stories**. London: IWA Publishing, 2013.

LEANDRO, A. M. **Avaliação da capacidade de instalação de telhados verdes na cidade de Lisboa com recurso a SIG e detecção remota (Dissertação de Mestrado)**. [S.l.]: Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.

Lei N° 16.033, de 20 de junho. Brazil, 2016.

Lei N° 16.034, de 20 de junho. Brasil, 2016.

Lei N° 162, de 20 de junho. Brasil, 2016.

LEIRA, M. H., et al. Qualidade da água e seu uso em pisciculturas. **Pubvet**, 11(1), 11–17. 2017 <https://doi.org/10.22256/pubvet.v11n1.11-17>

LIMA, M. V. A. et al. Reflexões sobre a validação do processo de apoio à decisão. XXXVI – SBPO, 12, 2004.

LUCENA, C. Y. S. et al. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências Do Nordeste**, 4(0), 1–17, 2018.

LUÍS, A. M.; CRUZ, M. J. (ORG.). **Contribuição para o estudo das alterações climáticas e adaptação do ciclo urbano da água**. 1^a ed. Lisboa: EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres S.A., Lisboa. 49pp., 2014.

MACHADO, José Carlos Pimenta et al. **Guia para reutilização de água para usos não potáveis**. Agência Portuguesa Do Ambiente (APA). Lisboa: [S.n.].

MAGALHÃES DA SILVA, R. Et al. Análise de desempenho e confiabilidade de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos sanitários descentralizadas. *Revista DAE*, 70(234), 78–92, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2022.006>

MALISA, R.; SCHWELLA, E.; KIDD, M. From ‘government’ to ‘governance’: A quantitative transition analysis of urban wastewater management principles in Stellenbosch Municipality. **Science of the Total Environment**, v. 674, p. 494–511, 2019.

MANCUSO, P. C. S. et al. *Reúso de água potável como estratégia para a escassez* (1st ed.). Manole, 2021.

MATOS, J. S. Ambiente e saneamento: sistemas de drenagem urbana. **Lisboa: IST Press.**, 2006.

MATZENAUER, Helena Barreto. **Uma metodologia multicritério construtivista de avaliação de alternativas para o planejamento de recursos hídricos de bacias**

hidrográficas. Porto Alegre, Brasil: Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

MENESES, Montse; PASQUALINO, Jorgelina C.; CASTELLS, Francesc. Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. **Chemosphere**, v. 81, n. 2, p. 266–272, 2010.

MOHAMMAD, Akar SalahAlddin. **The Challenges of Wastewater Disposal and Reuse in Erbil-KRG.** [S.I.]: School of Social Sciences and Engineering/University of Kurdistan Hewlêr, 2018.

MONTE, Helena Marecos do; ALBUQUERQUE, António. **Reutilização de Águas Residuais.** Lisboa: [S.n.].

NAKAZATO, C. D.; RODRIGUES, K. B. *Curso de Análise de Água para Operadores de ETE's: nível 2.* ReCESA, 2009.

NARR, Charlotte F. *et al.* Quantifying the effects of surface conveyance of treated wastewater effluent on groundwater, surface water, and nutrient dynamics in a large river floodplain. **Ecological Engineering**, v. 129, n. February, p. 123–133, 2019.

NGUYEN, L. D.; Tran, D. Q. FAHP - Based decision making framework for construction projects. In A. Emrouznejad & W. Ho (Eds.), *Fuzzy analytic hierarchy process* (p. 431). **CRC Press**, 2018.

NIKU, S. *et al.* Performace of activated sludge process and realiability-based design. **Journal Water Pollution Control Association**, 12(51), 2841–2857, 1979.

NOBRE, Paulo. Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado Brasileiro. In: LIMA, Ricardo da Cunha Correia; CAVALCANTE, Arnóbio de Mendonça Barreto; MARIN, Aldrin Martin Perez (Orgs.). **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro.** Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido – INSA, 2011. p. 25–36.

NUNES, Renata; DIÓGENES, Gustavo. **Maior usina de dessalinização do Brasil será construída no Ceará.** Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/2020/01/13/maior-usina-de-dessalinizacao-do-brasil-sera-construida-no-ceara/>>. Acesso em: 4 jul. 2020.

OLIVEIRA, Ulisses Costa de. *Proposta metodológica de cálculo do valor da multa ambiental por meio de análise multicritério e sistema de informação geográfica (SIG)*. Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, CE, Brasil, 2023.

OLIVEIRA, S. M. A. C. Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgoto. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; SPERLING, M. Von. Reliability analysis of wastewater treatment plants. **Water Research**, 1194–2008, 2008.

ORUMIEH, H. R. et al. Reliability analysis of waste stabilization pond under Iran's climate conditions. **European Online Journal of Natural and Social Sciences**, 3(3), 2014.

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of climate.** [S.I.]: United States: American Institute of Physics., 1992.

PEREIRA, O. G. et al. Crescimento do capim-tifton 85 sob doses de nitrogênio e alturas de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 30–35, 2012.

Prefeitura Municipal de Aquiraz. *PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO: ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO*, 2017. <http://www.aquiraz.ce.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/PMSB-AQUIRAZ.pdf>

Plano Nacional da Água. PortugalDiário da República, 1^a série - Nº 215 - 9/11/2016, , 2016.

POMPÉO, Cesar. Drenagem Urbana Sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 15–23, 2000.

PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS. **Decreto-Lei n.º 119/2019**. Diário da República nº 159/2019 Portugal Diário da República n.º 159/2019, Série I de 2019-08-21, 2019.

Resolução Nº 02/2017, de 2 de fevereiro do Conselho Estadual do Meio Ambiente. Brasil, 2017.

Resolução Nº 54/2005, de 28 de novembro do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. 2005.

RICART, Sandra. Challenges on European Irrigation Governance: From Alternative Water Resources to Key Stakeholders' Involvement. **Journal of Ecology & Natural Resources**, v. 3, n. 2, 2019.

ROUSSEEUW, P. J.; Leroy, A. M. *Robust regression and outlier detection*. John wiley & sons, 2003.

RUTKOWSKI, Emilia Wanda; SANCHES-PEREIRA, Alessandro. Emissões de todos: mudanças no saneamento pelo clima. In: CORDEIRO, Berenice S. (Org.). **Lei Nacional de Saneamento Básico: Perspectivas para as políticas e gestão dos serviços públicos**. Brasília: PNSS/MCid, 2009. p. 377–389.

SAATY, T. L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. In **McGraw-Hill**. 1980. <https://doi.org/10.1002/9781118644898.ch2>

SAFARI, A. *et al.* The application of multi-criteria (AHP-PROMETHEE) decision-making methods in selecting and prioritizing the green area irrigation resources. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 18(5), 1135–1146. 2021 <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02875-x>.

SHARMA, T., et al. Wastewater Treatment and Multi-Criteria Decision-Making Methods: A Review. **IEEE Access**, 11, 143704–143720. 2023
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3343150>.

SANTOS, M. et al. *Tratamento e utilização de esgotos sanitários: Reuso das águas de esgoto sanitário, inclusive desenvolvimento de tecnologias de tratamento para esse fim. Volume 2.* 2006.

SCHUTTER, J. L. G. de. Development of a Decision Support System for Wastewater Reuse in the Middle East. In M. K. Zaidi (Ed.), *Wastewater Reuse - Risk Assessment, Decision-Making and Environmental Security* (pp. 11–21). Springer. 2007

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Conheça o caminho das águas do São Francisco no Ceará.** Disponível em: <<https://www.srh.ce.gov.br/conheca-o-caminho-das-aguas-do-sao-francisco-no-ceara/>>. Acesso em: 4 jul. 2020.

Secretaria dos Recursos Hídricos. Governo do Estado do Ceará. **Plano de gerenciamento das águas das bacias metropolitanas: Relatório Final da Revisão.** <http://portal.cogerh.com.br/planos-de-bacias/category/54-relatoriofinal-edicao-definitiva-fase-i>. Acesso em: 4 jul. 2020.

SILVA, A. G. de B. *Efeito da irrigação com efluente de esgoto rico em sódio, em propriedades químicas e físico-hídricas de um Argissolo e produtividade de capim Tifton 85 no município de Lins Aijâni.* Dissertação de Mestrado - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, 2003.

SILVA, J. G. da. *Hidrogeologia da faixa costeira de Aquiraz-CE.* Dissertação de Mestrado -Instituto de Geociênciа e Ciências Exatas -Universiddade Estadual Paulista. 2000.

SILVA, S. C., et al. Remoção de Sais em Wetlands Construídos no Tratamento de Esgotos Domésticos Primários. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, 125–138, 2018.

SILVEIRA, A. G. M.C *Análise de eficiência e confiabilidade em sistemas de baixo custo de tratamento de esgoto do tipo lagoa de estabilização*, 2011.

SOUZA, Maria Cristina Oliveira; CORAZZA, Rosana Icassatti. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 42, p. 52–80, 2017.

SPERLING, M. von. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.

SRH. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará**. Fortaleza: [S.n.].

STOCKER, Thomas F. et al. (ORG.). **IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

TASSI, R. et al. Green roof: a sustainable alternative for stormwater management. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 139–154, 2014.

TESFAMARIAM, S.; SADIQ, R. Risk-based environmental decision-making using fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP). **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, 21(1), 35–50. 2006

TYBUSCH, Tania Marlene Marques et al. Meio ambiente e desenvolvimento sustentável: limites e perspectivas para uma sociedade sustentável. **Espacios**, 37, p. 19 pp, 2016.

UHMANN, I. M.; TAVARES, S. F. Avaliação do desempenho ambiental na utilização de telhados verdes extensivos em escolas públicas do Paraná. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, p. 206–218, 2017.

UNRIC. Relatório da ONU mostra população mundial cada vez mais urbanizada, mais de metade vive em zonas urbanizadas ao que se podem juntar 2,5 mil milhões em 2050. Disponível em: <<https://www.unric.org/pt/actualidade/31537-relatorio-da-onu-mostra-populacao-mundial-cada-vez-mais-urbanizada-mais-de-metade-vive-em-zonas-urbanizadas-ao-que-se-podem-juntar-25-mil-milhoes-em-2050>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

VASCONCELOS, J. S. de; BROSEGUINI, M. *Corrosão em Tubulação de Aço Carbono provocada por Água Doce*. Universidade Federal do Espírito Santo. 2013

WRI Brasil. *Ranking mostra onde há maior risco de faltar água no Brasil e no mundo*. <https://www.wribrasil.org.br/noticias/ranking-mostra-onde-ha-maior-risco-de-faltar-agua-no-brasil-e-no-mundo>. Acesso em: 26 jun. 2019.

ZHANG, X. *et al.* A review of the criteria and methods of reverse logistics supplier selection. **Processes**, 8, 705pp. 2020. <https://doi.org/10.3390/PR8060705>

ANEXO 1: DESCRIÇÃO DO SIGNIFICADO DOS PARÂMETROS DAS TABELAS 3.1 A 3.6

• Condutividade Elétrica

O parâmetro condutividade elétrica está relacionado com a salinidade da água usada para irrigação. A salinidade, por sua vez, é o resultado da acumulação de sais no solo, aumentando o potencial osmótico, o que impede ou dificulta, a captação de água por parte da planta e ainda origina alterações na absorção não seletiva de nutrientes (Almeida, 2010; Silva *et al.*, 2018).

A condutividade elétrica, devido à facilidade de sua determinação, é o parâmetro considerado para determinar a potencialidade da água de salinizar um solo. Ela basicamente considera a quantidade total de sais presentes na água, sem especificá-los e é definida como sendo a maior ou menor facilidade que tem a corrente elétrica de atravessar uma solução, sendo a seguinte equivalência de unidades:

$$1 \text{ dS/m} = 1 \text{ mmho/cm} = 1 \text{ mS/cm} = 1.000 \text{ } \mu\text{S/cm} = 1.000 \text{ } \mu\text{mho/cm}$$

Para se ter uma ideia da ordem de grandeza da condutividade elétrica das águas, tem-se a Tabela A1, a seguir, de acordo com Almeida (2010).

Tabela A1 - Tipos de água e suas respectivas condutividades elétricas. Fonte: Almeida (2010)

Origem da Água	CE a 25 °C
Água de chuva	0,15 dS/m = 150 $\mu\text{S/cm}$
Água média dos rios	0,2 – 0,4 dS/m = 200 – 400 $\mu\text{S/cm}$
Água do Mar Mediterrâneo	63 dS/m = 63.000 $\mu\text{S/cm}$
Água do Oceano Atlântico (máxima)	59 dS/m = 59.000 $\mu\text{S/cm}$
Água do Oceano Atlântico (média)	55 dS/m = 55.000 $\mu\text{S/cm}$
Água do Oceano Pacífico	51 dS/m = 51.000 $\mu\text{S/cm}$
Água do Oceano Índico	54 dS/m = 54.000 $\mu\text{S/cm}$
Água de irrigação de salinidade média	0,75 – 2,25 dS/m = 750 – 2.250 $\mu\text{S/cm}$

Quanto maior a concentração salina de uma solução, maior será a sua condutividade elétrica (CE). A medida da CE, portanto, é um bom indicador do perigo da salinidade do solo. Conforme Almeida (2010), o efeito imediato da concentração total de

sais é a redução da colheita, como consequência do aumento da pressão osmótica da solução.

- **Razão de Adsorção de Sódio**

A concentração de sódio é um parâmetro de qualidade devido ao seu efeito sobre a permeabilidade do solo, e sobre a nutrição e toxicidade das plantas. Uma maneira de conhecer o sódio presente na água é através da determinação da Razão de Adsorção de Sódio (RAS), que indica a proporção relativa em que se encontra o cátion sódio (Na^+) em relação ao cátion Cálcio (Ca^+) e o cátion magnésio (Mg^+), cátions divalentes que competem com o sódio pelos lugares de intercâmbio no solo. Esta consideração é de grande importância quando há predominância do íon sódio, que induzirá trocas de íons cálcio e magnésio pelos de sódio no solo, o que pode conduzir à degradação do mesmo, com a consequente perda de sua estrutura e permeabilidade (Almeida, 2010; Monte & Albuquerque, 2010; Silva *et al.*, 2018).

A diminuição da capacidade de infiltração do solo está normalmente associada com as águas de irrigação de elevada concentração de sódio, em relação a concentração de cálcio e magnésio e/ou com a baixa concentração de sais solúveis. Isto é, quantidades relativamente altas de sódio ou baixa de cálcio e magnésio no solo e água, reduzem a velocidade com que a água de irrigação se infiltra na superfície do solo, podendo alcançar tal magnitude, que as raízes das plantas não recebem água suficiente entre as irrigações (Almeida, 2010). Isto é, as águas com teor de sódio elevado ou com teor reduzido dos elementos cálcio e magnésio tendem a influenciar a redução da permeabilidade do solo, favorecendo o encharcamento das raízes e dificultando o desenvolvimento das plantas (Braga *et al.*, 2020).

Em resumo, a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) é uma razão que indica a percentagem de sódio contido numa água que pode ser adsorvido pelo solo, e quanto maior a RAS, menos apropriada será a água para irrigação (Braga *et al.*, 2020).

Apesar do estabelecimento de um limite de Razão de Adsorção de Sódio e de Condutividade Elétrica em águas usadas na irrigação, dependendo do solo, do tratamento empregado ao solo e da cultura a ser irrigada, águas com elevados teores de sódio e elevada salinidade ainda podem ser utilizadas, conforme explica Almeida

(2010) e Braga *et al.*, (2020). Segundo esses autores, o United States Salinity Laboratory (USSL) categorizou as águas segundo os seguintes critérios:

Risco de Sódio

- ✓ S1: águas fracamente sódicas. Podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de formação de teores nocivos de sódio suscetível de troca. Se prestam ao cultivo de quase todos os vegetais;
- ✓ S2: águas medianamente sódicas. Apresentam perigo de sódio para solos de textura fina e forte capacidade de troca de cátions. Podem ser utilizadas nos solos de textura grosseira ou ricos em matéria orgânica) com boa permeabilidade;
- ✓ S3: águas altamente sódicas. Há perigo de formação de teores nocivos de sódio na maioria dos solos, salvo os gipsíferos. Exigem tratamento especial do solo (boa drenagem, lixiviação e presença de matéria orgânica), e podem ser utilizadas em vegetais com alta tolerância ao sódio;
- ✓ S4: águas extremamente sódicas. Geralmente imprestáveis para a irrigação, salvo se a salinidade global for fraca, ou pelo menos média. Podem ser aplicadas em solos altamente drenáveis ricos em carbonatos.

Risco de Salinidade ou Salinização

1. C0: águas de salinidade fraquíssima, que podem ser utilizadas sem restrições para irrigação;
2. C1: águas de salinidade fraca, com Condutividade Elétrica (CE) compreendida entre 100 e 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25º C. Podem ser utilizadas para irrigar a maioria das culturas, na maioria dos solos, com pequeno risco de incidentes provenientes da salinização do solo, exceto se a permeabilidade do solo for extremamente fraca;
3. C2: águas de salinidade média, com Condutividade Elétrica (CE) entre 250 e 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Devem ser usadas com precaução, podendo ser utilizadas em solos siltoarenosos, siltosos ou areno-argilosos quando houver uma lixiviação moderada do

solo. Os vegetais de fraca tolerância salina podem ainda serem cultivados na maioria dos casos;

4. C3: águas de alta salinidade, com Condutividade Elétrica (CE) entre 750 e 2.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Só podem ser utilizadas em solos bem drenados. Mesmo em solos bem cuidados, devem ser tomadas precauções especiais para evitar a salinização, e apenas os vegetais de alta tolerância salina deve ser cultivados;

5. C4: águas de salinidade muito alta, com Condutividade Elétrica (CE) entre 2.250 e 5.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Geralmente não servem para irrigação, podendo ser, excepcionalmente, utilizadas em solos arenosos permeáveis, bem cuidados e abundantemente irrigados. Apenas os vegetais de altíssima tolerância salina podem ser cultivados nestas condições;

6. C5: águas de salinidade extremamente alta, com Condutividade Elétrica (CE) entre 5.000 e 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. São águas utilizáveis apenas em solos excessivamente permeáveis e muito bem cuidados. A única exceção é o cultivo de palmeiras.

- **Ovos de Geohelminto**

Os geohelmintos são parasitas cujo ciclo evolutivo, necessariamente, precisa ocorrer em parte no solo, onde é a fonte de infecção contendo larvas e ovos, e finalmente em um hospedeiro. Logo, as espécies geohelmínticas são preocupantes, já que a capacidade de resistência aos fatores climáticos do meio ambiente é diretamente proporcional à resistência dos seus ovos, que igualmente resistem às condições ambientais adversas (Holanda & Vasconcellos, 2015; Leon *et al.*, 2020).

As principais espécies que infectam o homem classificadas como geohelmintos são: *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Ancilostomídeos* (*Ancylostoma duodenale* e *Necator americanus*) e *Strongyloides stercoralis* (Holanda & Vasconcellos, 2015; Leon *et al.*, 2020).

Dessa forma, pela possibilidade de contaminação humana, a determinação e eliminação dos ovos de geohelmintos é necessária nas águas de irrigação.

- **Coliformes Fecais (*E.coli*)**

Há vários organismos cuja presença em um corpo de água indica uma forma qualquer de poluição. Para indicar, no entanto, a poluição de origem humana, adotam-se os organismos do grupo coliforme fecal (exemplo: *Escherichia coli*), como indicadores (FUNASA, 2019).

As bactérias coliformes são típicas do intestino do homem e de outros animais de sangue quente (mamíferos) e, por estarem presentes nas fezes humanas (100 a 400 bilhões de coliformes/hab.dia) e serem de simples determinação, são adotadas como referência para indicar e medir a grandeza da contaminação por matéria fecal. No esgoto, faz-se a pesquisa de coliformes e, quando encontrados nas amostras examinadas, considera-se que os organismos patogênicos também estão presentes (FUNASA, 2019).

Nos esgotos não há o interesse em se detectar a presença de matéria fecal utilizando os coliformes, uma vez que se sabe, a priori, que esgotos domésticos contêm, em essência, matéria excretada. No entanto, os coliformes são usados como indicadores da eficiência de remoção de organismos patogênicos (principalmente bactérias e vírus) no tratamento dos esgotos (FUNASA, 2019).

- **Potencial Hidrogeniônico**

O Potencial Hidrogeniônico (pH) é um parâmetro indicativo do grau de acidez ou alcalinidade do meio. No caso de águas de irrigação, o pH normal está compreendido entre 6,0 e 8,5. Um pH fora deste intervalo, é um bom indicador de uma água não apropriada ou de presença de um íon tóxico, que pode incidir negativamente na população microbiana do solo, alterar os equilíbrios existentes no mesmo, e inclusive danificar o sistema radicular das plantas, conforme relata Almeida (2010). Segundo o mesmo autor, o pH fora da faixa acima mencionada indica ser necessário correções da acidez ou da alcalinidade. O maior perigo das águas com valores anormais de pH está nos possíveis problemas de deterioração do equipamento de irrigação.

- **Temperatura**

Importante na dissolução da água, a temperatura tem incidência sobre vários parâmetros físico-químicos que, por sua vez, podem afetar a qualidade da água para irrigação.

A água de irrigação atua sobre a temperatura do solo e da planta modificando seu regime térmico, em ou outro sentido, em função da época da aplicação e da origem da água. Esse parâmetro também exerce influência na infiltração superficial, de modo que, em determinadas situações é necessário construir reservatórios de água para irrigar quando o solo está mais frio ou água mais quente (Almeida, 2010).

Segundo a Resolução COEMA Nº 02/2017, a determinação da temperatura da água reutilizada é exigida na aquicultura, pois para essa atividade a temperatura é um dos fatores mais importantes nos fenômenos biológicos. Conforme Leira *et al.*, (2017), todas as atividades fisiológicas (respiração, digestão, crescimento, reprodução e comportamento) dos peixes estão intimamente ligadas à temperatura da água. Quanto mais alta a temperatura, maior a atividade dos peixes e, consequentemente, maior o consumo de oxigênio.

- **Nitrogênio**

Apesar de não constar na Tabela 2.11, quando se trata de efluente sanitário, a concentração de nitrogênio (um dos 16 elementos englobados na designação de nutrientes) é um parâmetro importante a ser determinado, principalmente quando a reutilização ocorre na agricultura.

As plantas necessitam de alguns dos 16 nutrientes em quantidades sensivelmente superiores às de outros, pelo que os primeiros são classificados como macronutrientes e os segundos como micronutrientes. Além do nitrogênio (N), os macronutrientes compreendem o fósforo (P), o potássio (K), o cálcio (Ca), o magnésio (Mg), o enxofre (S), o cloro (Cl) e o silício (Si). De um modo geral, o N, o P e o K, que são correntemente designados como macronutrientes principais, não existem no solo em quantidades suficientes para o desenvolvimento das culturas, o que determina a necessidade da sua adição ao solo (Monte & Albuquerque, 2010).

O nitrogênio contido na água de irrigação tem o mesmo efeito para as plantas que o nitrogênio aplicado com os fertilizantes. O nitrogênio facilmente assimilável se encontra nas águas em forma de nitrato (NO_3^-) e de amônio (NH_4^+). Nas águas de irrigação convencionais a forma mais frequente é a de nitrato, cujo conteúdo

normalmente é inferior a 50 mg/L. O nitrogênio contido em forma de amônio raras vezes é superior a 1 mg/L, salvo quando se trata de água residual ou proceda de lixiviação de solos fertilizados com nitrogênio amoniacial (Almeida, 2010).

A presença de nitrogênio nas águas de irrigação deve ser considerada positiva, desde que se possa supor como uma adubação da unidade de fertilizante. Assim, a quantidade de fertilizante nitrogenado que se aplica aos cultivos irrigados com águas que contenham níveis elevados de nitrogênio, deve-se reduzir uma quantidade deste elemento similar a aplicada com a irrigação. É por isso que se diz que a irrigação com água reutilizada reduz a quantidade de fertilizante artificial que se utilizaria. O Nitrogênio é, portanto, um elemento útil que deve ser aproveitado (Almeida, 2010).

- **DBO/CBO**

É a forma mais utilizada para se medir de forma indireta a quantidade de matéria orgânica presente no esgoto ou, em outras palavras, medir a quantidade de oxigênio necessário para estabilizar bioquimicamente a matéria orgânica presente no volume padronizado de uma amostra, pela ação de bactérias aeróbias, num determinado período de tempo e numa dada temperatura. Convencionou-se estabelecer a DBO-padrão como medida da matéria orgânica carbonácea, procedendo-se à análise no quinto dia e mantendo-se durante o teste a temperatura da amostra em 20°C, passando a ser expressa como DBO₅ (FUNASA, 2019).

Quanto maior o grau de poluição orgânica, maior será a DBO. A DBO vai reduzindo-se gradativamente durante o processo aeróbio até se anular, quando então a matéria orgânica estará totalmente estabilizada. Normalmente a uma temperatura de 20°C, e após 20 dias, é possível estabilizar cerca de 99% da matéria orgânica dissolvida ou em estado coloidal presente nos esgotos domésticos. Esta demanda total é chamada de demanda última de oxigênio (DBO_u), cujo valor para os esgotos domésticos é próximo a 1,5 vez a DBO₅ (FUNASA, 2019).

Em geral, a DBO é representada por miligrama por litros (mg/l), e nos esgotos domésticos brutos varia entre 250 e 350 mg/L. Esses valores, entretanto, podem ser bem mais elevados, dependendo da região e das características do esgoto. Em outras palavras, o número em miligramas indica a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar bioquimicamente a matéria orgânica presente em um litro de esgoto (FUNASA, 2019).

- **DQO/CQO**

Esta indicação, indireta do teor de matéria orgânica presente numa amostra de esgoto, mede o consumo de oxigênio para a sua oxidação química, obtida por meio de um forte oxidante (dicromato de potássio), enquanto na DBO a oxidação é realizada inteiramente pela ação dos microrganismos (FUNASA, 2019).

Apresenta a vantagem de ser uma análise rápida, levando-se de 2 a 3 horas para ser realizada, e dá uma boa indicação do oxigênio requerido para a estabilização da matéria orgânica carbonácea (biodegradável e não biodegradável). Todavia, oxida também a fração inerte (constituintes inorgânicos presentes), e, com isto, superestima a quantidade de oxigênio necessário para o tratamento biológico do esgoto. Para o esgoto doméstico bruto, a DQO normalmente varia de 450 a 800 mg/L e a relação DQO/DBO varia de 1,7 a 2,4, sendo usual adotar o valor de 2,0 (FUNASA, 2019).

- **Dureza**

A dureza da água é a propriedade que decorre da presença de metais alcalinos terrosos, em que o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) são os principais elementos presentes nas águas naturais. Desta maneira, medindo-se os teores de Ca e Mg, pode-se identificar os níveis de dureza. Os sais de cálcio e magnésio presentes na solução são responsáveis pelos diversos níveis de dureza da água. Quando a água de um determinado sistema apresenta níveis de dureza elevados, maior é a quantidade do sal carbonato de cálcio (CaCO_3) que pode promover maior ocorrência de incrustação sobre a superfície metálica (Vasconcelos & Broseguini, 2013).

- **Turbidez**

O parâmetro turbidez (ou turvação) corresponde a concentração de partículas suspensas e coloidais presentes na massa líquida. Expressa a interferência à passagem de luz por meio do líquido, isto é, a transparência da água. Comumente, respondem pela turbidez das águas naturais fragmentos de argila, silte, plâncton, micro-organismos, matéria orgânica e inorgânica, e está geralmente compreendida na faixa de 3 a 500 uT (unidade de turbidez), sendo inferior a 1,0 uT para águas subterrâneas com significativa frequência decorrente da presença de ferro e manganês (FUNASA, 2019).

- **Sólidos Totais Dissolvidos**

Quimicamente, os Sólidos Dissolvidos Totais representam o montante de uma gama de compostos solubilizados na água, seja na forma coloidal, molecular ou iônica, indicando a massa total de matéria dissolvida por unidade de volume de água. Assim, varia significativamente com o pH e a temperatura da água, parâmetros que determinam a capacidade de solubilização dos compostos (Felippe & Neto, 2019).

Enquanto parâmetro de qualidade da água, os Sólidos Dissolvidos Totais possuem uma grande importância ecológica e sanitária. Determinadas comunidades biológicas podem se desenvolver em faixas restritas de Sólidos Dissolvidos Totais, afetando a biodiversidade dos ambientes aquáticos. Além disso, uma parcela importante desses sólidos está associada à salinidade das águas, colocando, assim, limitações sanitárias aos seus eventuais usos (Felippe & Neto, 2019).

- **Sólidos Suspensos Totais**

Geralmente a água contém as mais diversas partículas em suspensão, as quais necessitam ser removidas a fim de tornar a água adequada para uso. Essas partículas podem originar corrosão sob depósito, devido a formação de pilhas de aeração diferencial. Essas partículas ainda influenciam no tratamento indicado para a água, como por exemplo, no controle de pH e dureza. Óxido de cálcio, por exemplo, elevaria a dureza e o pH da água (Vasconcelos & Broseguini, 2013).

Estes materiais são geralmente leves e abrasivos. Eles são capazes de se depositar nas áreas de baixo fluxo, formando uma barreira física, evitando o oxigênio de alcançar a interface metal/solução. Esta barreira irá contribuir para a formação de células de aeração diferencial e irá promover, também, um ataque por corrosão localizada, além de interferir na desinfecção de microrganismos, dificultando-a (Vasconcelos & Broseguini, 2013).

ANEXO 2: LOCALIZAÇÃO DAS ATIVIDADES ECONÔMICAS DO MUNICÍPIO DE AQUIRAZ, COM BASE NAS OUTORGAS VIGENTES EXPEDIDAS PELA SRH

(continua)

ATIVIDADE	EMPRESA	COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM SIRGAS 200	
		E	N
	AGROPECUÁRIA ESTRELA DO SUL LTDA-ME	554000	9555459
	VICTOR DE ARAUJO LEITE MUHLERT	568979	9562751
	CEARA COMERCIO E SERVIÇOS DE PORTAS LTDA	564830	9570088
	CEARÁ CERAMICA LTDA	555942	9555445
	CEAGRA CERAMICA E AGROPECUARIA ASSUNCAO LIMITADA	553853	9558788
	AMBEV S.A.	552050	9553856
	QUASSIA INDUSTRIA E COMERCIO DE AGUA LTDA	567244	9556700
	SANTELISA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS S/A	577539	9560048
	CORPO DOURADO INDUSTRIA DE COSMÉTICOS	559797	9565726
	FLOEMA INDUSTRIA DE PRODUTOS NATURAIS LTDA	565733	9568604
	FERREIRA & SILVA INDUSTRIA E COMERCIO DE AGUA LTDA	564694	9569978
	ILUMINAGUA ÁGUAS DO BRASIL LTDA-ME	563449	9552888
	USIBRAS USINA BRASILEIRA DE OLEOS E CASTANHA LTDA	568379	9566076
	TOP AGUAS LTDA	564029	9570193
	CRISTALINA ALIMENTOS E BEBIDAS LTDA - EPP	562280	9566072
INDUSTRIAL	L.W. AGROPECUARIA E INDUSTRIAL LTDA	565847	9563226
	FRESENIUS KABI DO BRASIL LTDA	563045	9569603
	ANA C N DA MOTA CERAMISTA	561391	9562187
	USIBRAS USINA BRASILEIRA DE OLEOS E CASTANHA LTDA	569542	9564769
	Hélio Pereira de Lima	568173	9567543
	PETRUS DUARTE BEZERRA - ME	560789	9566059
	FRESENIUS KABI DO BRASIL LTDA	563042	9569687
	ILUMINAGUA ÁGUAS DO BRASIL LTDA-ME	566041	9555527
	CERÂMICA ASSUNÇÃO LTDA	560036	9562632
	FRESENIUS KABI DO BRASIL LTDA	563045	9569603
	GUT GURT INDUSTRIA E COMERCIO DE ALIMENTOS LTDA	559975	9566882
	RELIFE EMBALAGENS LTDA	563106	9569503
	J F - INDUSTRIA E COMERCIO DE DOCES LTDA	560119	9566972
	CERÂMICA AQUIRAZ LTDA	566719	9566359
	I2SC INDUSTRIA DE PRODUTOS QUIMICOS LTDA	559823	9565756
	TARCIO SALESIO LOCH	570271	9561012
	GILDARLEY SENA DO NASCIMENTO	564876	9569243

ATIVIDADE	EMPRESA	COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM SIRGAS 200	
		E	N
	CRISTALINA ALIMENTOS E BEBIDAS LTDA - EPP	562105	9566105
	MARCONI CORDEIRO MAGALHAES	554621	9562358
	PISCICULTURA TANGANYIKA COMERCIO E REPRESENTAÇÕES LTDA - ME	568359	9567970
PISCICULTURA	PISCICULTURA TANGANYIKA COMERCIO E REPRESENTAÇÕES LTDA - ME	568671	9567783
	PISCICULTURA TANGANYIKA COMERCIO E REPRESENTAÇÕES LTDA - ME	568572	9567904
	ARBORETO EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS	568169	9563480
	SANTELISA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS S/A	577539	9560048
IRRIGAÇÃO	REGINA MARIA FURQUIM WERNECK SANTIAGO	562679	9567979
	ANTONIO MARILIO NOGUEIRA DE SOUZA	563027	9551607
	SETEG	568169	9563480
	POSTO BOM RETIRO LTDA	565852	9569240
	POLIBRAS BRASIL SOFTWARE LTDA	567807	9568182
	J WELLINGTON RENOVADORA DE PNEUS LTDA - ME	554396	9563272
	LH COMERCIO DE DERIVADOS DE PETROLEO LTDA	563086	9569598
	OM COMERCIAL DE PETRÓLEO EIRELI	565819	9569361
	ROSANNI MACHADO CAMBRAIA ME	561557	9565528
	JOANA EVELYNE PESSOA E SILVA	566903	9574983
	CAPOLA PARTICIPAÇÕES LTDA	566055	9575032
	FRANCISCO TARCISIO SEABRA FILHO	568297	9573828
	SUCESSO INDUSTRIA E COMERCIO DE PVC LTDA	560863	9566243
	TDG - TRANSMISSORA DELMIRO GOUVEIA S/A	566447	9565758
	PARACLITO ENGENHARIA LTDA	568139	9573894
	M R M INCORPORACOES DE IMOVEIS LTDA	571484	9562019
	CONDOMINIO MARIUBA PARK RESORT	567822	9574829
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567577	9575139
SERVIÇO E COMÉRCIO	Eolica Prainha Ltda	569097	9572094
	CONDOMINIO ACQUA	567473	9575461
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567372	9575091
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567703	9575164
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567197	9574937
	CATULEVE - CLUBE DE AVIACAO DESPORTIVA	568868	9564574
	CONDOMINIO MARIUBA PARK RESORT	567881	9574950
	CONDOMÍNIO WELLNESS RESORT APART-HOTEL	567596	9574961
	COMPANHIA ENERGETICA DO CEARA	554921	9551339
	CONDOMINIO AQUIRAZ RIVIERA	574915	9565216
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567184	9575822
	FENIX COMERCIO DE MAQUINAS E GRANITO LTDA	567686	9567517
	Winy Maria Grangeiro Nobre	564803	9568293
	ONVIT ALIMENTOS LTDA	568598	9564213
	MW INDUSTRIA LTDA	574509	9564348
	CONDOMINIO ACQUA	567547	9575400
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567574	9575240

(continua)

ATIVIDADE	EMPRESA	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		UTM SIRGAS 200	
		E	N
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567617	9575252
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567748	9575009
	COMPANHIA HIDRO ELETRICA DO SAO FRANCISCO	566447	9565758
	BOTTINO E FERREIRA HOTEIS E RESTAURANTES LTDA	567058	9574306
	ATEX DO BRASIL LOCACAO DE EQUIPAMENTOS LTDA	565945	9569185
	FACCHINI S/A	553918	9561617
ATIVIDADE	BRISA SHOPPING AQUIRAZ LTDA	568042	9568050
	FRANCISCO DAS CHAGAS ALMEIDA DOS SANTOS	567929	9568052
	LAGUNA HOTÉIS RESIDENCE E RESORT LTDA	572640	9568191
	IAN COMERCIO DE COMBUSTIVEL EIRELI	570310	9562117
	HOTEL NEW-LIFE DE EMAGRECIMENTO (SPA) (TURISMO)	572331	9568197
	SUPORTE TECNOLOGIA EM POSTES LTDA	554388	9561726
	WINY MARIA GRANGEIRO NOBRE LTDA	564803	9568293
	MEROTUSA MERUOCA EMPREENDIMENTOS TURISTICOS - SA	571303	9570025
	MARQUISE 25 EMPREENDIMENTOS IMOBILIARIOS LTDA.	569008	9573049
	ACN SERVIÇOS EIRELI ME	566831	9575725
	José Higor Batista Araújo da Costa	566600	9575475
	CONDOMINIO PARAISO DAS DUNAS RESIDENCE FLAT	567084	9576006
	JOSÉ EVENILDE LUSTOSA DA COSTA MARTINS	567650	9574582
DEMAIS USOS	DUNNAS INCORPORADORA SPE LTDA	565863	9576575
	COMPLEXO TURISTICO MANDARA - GLEBA E-03	569534	9572381
	COMPLEXO TURÍSTICO MANDARA - GLEBA E - 04	569604	9572296
	BEACH PLACE RESORT RESIDENCE	570838	9569898
	VITORIA CONSTRUTORA E INCORPORADORA LTDA	568675	9565839
	SPE - ESPIRITO SANTO INVESTIMENTOS IMOBILIARIOS S.A	574156	9560374
	MARIA LUIZA AGUIAR DAMASCENO	568210	9573721
	EDIFICIO BEACH WAY	568137	9574422
	CONDOMINIO MANHATTAN BEACH RIVIERA	574959	9566158
	CONDOMINIO GOLF VILLE	568235	9573288
	F F COMERCIO DE VARIEDADES LTDA	563391	9569716
	CONDOMINIO VILLAGIO DO PORTO	566896	9575801
	Condominio Portugal Village	565675	9576404
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567523	9574823
	CONDOMÍNIO PORTAMARIS RESORT	567026	9576172
DEMAIS USOS	JOVINO ANTÔNIO PEREIRA DE OLIVEIRA	567859	9573412
	CONDOMINIO PORTA ROMANA RESIDENCE	567156	9574372
	Pedro Valber Montenegro pontes	574148	9564243
	CONDOMINIO PARQUE DAS ILHAS WATER - HOME RESORT	566947	9576046
	CONDOMINIO MEDITERRANEE	566823	9575830
	COMPLEXO TURÍSTICO MANDARA - GLEBA E - 04	569563	9571903
	Wanderson Rodrigues Pinheiro	566380	9574976
	FABRICIO SILVA NOGUEIRA	563549	9569311
	NOVO HORIZONTE COMÉRCIO E DERIVADOS DE PETRÓLEO LTDA	554684	9552948

(conclusão)

ATIVIDADE	EMPRESA	COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM SIRGAS 200	
		E	N
ATIVIDADE	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	569149	9572580
	Usina Ecocycle LTDA	565571	9568909
	PORTO BEACH RESIDENCIAL	567419	9575195
	CONDOMINIO EDIFICIO TERRAMARIS RESORT	568119	9574361
	LUCINEI AQUINO GOMES	566269	9575562
	BEACH PARK HOTÉIS E TURISMO S/A	567707	9574685
	Pamala Rae Butler	576312	9565414
	S A C COMERCIO DE COMBUSTIVEIS LTDA	571874	9562421
	MARQUISE SERVIÇOS AMBIENTAIS	567558	9565153
	PHELIPE DOS SANTOS DOURADO	571769	9562575

**ANEXO 3: RESULTADO DO MONITORAMENTO DA ÁGUA RESIDUAL TRATADA
NA ETAR DE AQUIRAZ**

(Continua)

OBSERVAÇÃO	DATA DA COLETA	E. coli NMP/100 mL	Ovo de Geohelminto Ovo/L	Conduktividade Elétrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	RAS $(\text{mmol L}^{-1})^{1/2}$	Temperatura $^{\circ}\text{C}$
1	06/2019	22,00	ND*		8,00		32,20
2	07/2019	130,00	ND*	558,80	7,70	19,24	
3	08/2019	22,00	ND*	587,70	8,10	27,51	
4	09/2019	28,00	ND*	855,10	8,80	24,24	29,30
5	10/2019	110,00	ND*	1.010,90	8,60	39,19	
6	11/2019	440,00	ND*	1.039,60	8,70	33,05	
7	12/2019	280,00	ND*	997,20	7,70	32,12	30,10
8	01/2020	780,00	ND*	1.001,60	7,70	31,91	
9	02/2020	240.000,00	ND*	764,40	7,80	27,10	
10	04/2020	480,00	ND*	674,00		15,58	
11	05/2020	220,00	ND*		7,80		
12	06/2020	24,00	ND*	591,90	7,60	17,15	27,30
13	07/2020	24,00	ND*	476,90	8,60	28,56	
14	08/2020	98,00	ND*	997,40	7,90	24,12	29,10
15	09/2020	680,00	ND*	1.144,70	7,80	30,46	
16	10/2020	77,00	ND*	1.053,20	7,40	34,54	
17	11/2020	820,00	ND*	1.043,20	7,90	31,77	
18	12/2020	1.000,00	ND*	1.062,60	7,50	30,72	30,10
19	01/2021	1.300,00	ND*	1.179,20	7,60	31,16	29,10
20	02/2021	580,00	ND*	1.126,10	7,60	33,29	
21	03/2021	980,00	ND*	1.105,70	7,80	37,51	28,10
22	04/2021	360,00	ND*	1.002,90	8,00	26,08	
23	05/2021	53,00	ND*	915,00	7,90	19,50	
24	06/2021	140,00	ND*	721,70	7,60	19,50	28,60
25	07/2021	77,00	ND*		8,10	20,62	
26	08/2021	200,00	ND*	1.015,00	7,80	34,75	
27	09/2021	150,00	ND*	979,00	7,60	41,02	28,20
28	10/2021	1.400,00	ND*	1.102,00	7,30	42,44	
29	11/2021	510,00	ND*	1.103,00	7,60	21,61	
30	12/2021	850,00	ND*	1.137,00	7,60	39,43	29,10
31	01/2022	1.200,00	ND*	1.189,00	7,70	24,70	
32	02/2022	340,00	ND*	1.040,00	7,60	23,35	
33	03/2022	4.200,00	ND*	970,10	8,00	10,23	33,00
34	04/2022	2.800,00	ND*	788,50	7,80	20,38	
35	05/2022	5.200,00	ND*		8,00	16,20	
36	06/2022	770,00	ND*		7,90	15,64	27,50
37	07/2022	1.500,00	ND*		7,90	19,43	
38	08/2022	150,00	ND*	996,20	8,10	27,47	

(conclusão)

OBSERVAÇÃO	DATA DA COLETA	E. coli NMP/100 mL	Ovo de Geohelminto Ovo/L	Conduvidade Elétrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	RAS ($\text{mmol Cl}^{-1/2}$)	Temperatura °C
39	09/2022	2.000,00	ND*	1.199,60	7,90	30,01	28,00
40	10/2022	3.000,00	ND*	1.206,50	8,20	32,69	
41	11/2022	2.400,00	ND*	1.168,80	8,00	31,06	
42	12/2022	980,00	ND*	1.230,70	8,00	35,33	29,30
43	01/2023	360,00	ND*		7,70		
44	02/2023	61,00	ND*		7,80		
45	03/2023	1.000,00	ND*		7,90		27,50
46	04/2023	520,00	ND*		7,80		
47	05/2023	680,00	ND*		8,00		
48	06/2023	680,00	ND*		8,00		31,00
49	07/2023	1.400,00	ND*		7,80		
50	08/2023	6.800,00	ND*		8,10		

*ND: NÃO DETECTADO

ANEXO 4: ETAPAS DO MÉTODO FUZZY AHP PARA DETERMINAÇÃO DOS PESOS DOS INDOCADORES E PARÂMETROS

Tabela A4.1 – Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para a comparação entre os indicadores

ESPECIALISTAS	ETAPA 2: JULGAMENTO DOS ESPECIALISTAS					
	$C_1 \times C_2$	$C_1 \times C_3$	$C_1 \times C_4$	$C_2 \times C_3$	$C_2 \times C_4$	$C_3 \times C_4$
1	9	9	1	3	1/5	1/9
2	3	9	3	5	9	5
3	3	3	9	1	3	3
4	3	3	5	3	3	9
5	1/3	1	1/7	3	1/3	1/5

Tabela A4.2 – Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador técnico

ESPECIALISTAS	ETAPA 2: JULGAMENTO DOS ESPECIALISTAS		
	$C_{11} \times C_{12}$	$C_{11} \times C_{13}$	$C_{12} \times C_{13}$
1	3	7	3
2	1/5	1/7	1
3	1/3	1/3	1
4	1/5	1/3	3
5	1/3	1	3

Tabela A4.3 – Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador social

ESPECIALISTAS	ETAPA 2: JULGAMENTO DOS ESPECIALISTAS		
	$C_{21} \times C_{22}$	$C_{21} \times C_{23}$	$C_{22} \times C_{23}$
1	1/5	1/7	1
2	1	9	1
3	3	5	3
4	5	9	3
5	5	3	5

Tabela A4.4 – Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador ambiental

ESPECIALISTAS	ETAPA 2: JULGAMENTO DOS ESPECIALISTAS		
	$C_{31} \times C_{32}$	$C_{31} \times C_{33}$	$C_{32} \times C_{33}$
1	3	3	1/3
2	9	5	1/3
3	3	5	1
4	5	7	1
5	7	3	1

Tabela A4.5 – Conversão dos julgamentos linguísticos em julgamentos numéricos para os parâmetros do indicador econômico

ESPECIALISTAS	ETAPA 2: JULGAMENTO DOS ESPECIALISTAS		
	$C_{41} \times C_{42}$	$C_{41} \times C_{43}$	$C_{42} \times C_{43}$
1	1	1/5	1/5
2	9	1/3	1/5
3	1	1/3	1/3
4	1	1/7	1/5
5	5	3	1

Tabela A4.6 – Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para as comparações dos indicadores

ETAPA 3: CONVERSÃO DOS JULGAMENTOS EM NÚMEROS TRIANGULARES FUZZY									
ESPECIALISTA	$C_1 \times C_2$			$C_1 \times C_3$			$C_1 \times C_4$		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u
1	8	9	9	8	9	9	1	1	1
2	2	3	4	8	9	9	2	3	4
3	2	3	4	2	3	4	8	9	9
4	2	3	4	2	3	4	4	5	6
5	1/4	1/3	1/2	1	1	1	1/8	1/7	1/6
Min (l), Max (u) e média geométrica (m)	0,25	2,41	9	1	3,74	9	0,125	1,81	9

ETAPA 3: CONVERSÃO DOS JULGAMENTOS EM NÚMEROS TRIANGULARES FUZZY

ESPECIALISTA	C ₂ x C ₃			C ₂ x C ₄			C ₃ x C ₄		
	/	m	u	/	m	u	/	m	u
1	2	3	4	1/6	1/5	1/4	1/9	1/9	1/8
2	4	5	6	8	9	9	4	5	6
3	1	1	1	2	3	4	2	3	4
4	2	3	4	2	3	4	8	9	9
5	2	3	4	1/4	1/3	1/2	1/6	1/5	1/4
Min (l), Max (u) e média geométrica (m)	1	2,67	6	0,16	1,40	9	0,11	1,24	9

Tabela A4.7 – Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador técnico

ETAPA 3: CONVERSÃO DOS JULGAMENTOS EM NÚMEROS TRIANGULARES FUZZY

ESPECIALISTA	C ₁₁ x C ₁₂			C ₁₁ x C ₁₃			C ₁₂ x C ₁₃		
	/	m	u	/	m	u	/	m	u
1	2	3	4	6	7	8	2	3	4
2	1/6	1/5	1/4	1/8	1/7	1/6	1	1	1
3	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2	1	1	1
4	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	2	3	4
5	1/4	1/3	1/2	1	1	1	2	3	4
Min (l), Max (u) e média geométrica (m)	0,17	0,42	4	0,13	0,64	8	1	1,93	4

Tabela A4.8 – Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador social

ETAPA 3: CONVERSÃO DOS JULGAMENTOS EM NÚMEROS TRIANGULARES FUZZY

ESPECIALISTA	C ₂₁ x C ₂₂			C ₂₁ x C ₂₃			C ₂₂ x C ₂₃		
	/	m	u	/	m	u	/	m	u
1	1/6	1/5	1/4	1/8	1/7	1/6	1	1	1
2	1	1	1	8	9	9	1	1	1
3	2	3	4	4	5	6	2	3	4
4	4	5	6	8	9	9	2	3	4
5	4	5	6	2	3	4	4	5	6
Min (l), Max (u) e média geométrica (m)	0,17	1,72	6	0,13	2,80	9	1	2,14	6

Tabela A4.9 – Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador ambiental

ETAPA 3: CONVERSÃO DOS JULGAMENTOS EM NÚMEROS TRIANGULARES FUZZY										
ESPECIALISTA	C ₃₁ x C ₃₂			C ₃₁ x C ₃₃			C ₃₂ x C ₃₃			
	/	m	u	/	m	u	/	m	u	
1	2	3	4	2	3	4	1/4	1/3	1/2	
2	8	9	9	4	5	6	1/4	1/3	1/2	
3	2	3	4	4	5	6	1	1	1	
4	4	5	6	6	7	8	1	1	1	
5	6	7	8	2	3	4	1	1	1	
Min (/), Max (u) e média geométrica (m)	2	4,90	9	2	4,36	8	0,25	0,64	1	

Tabela A4.10 – Números triangulares fuzzy dos julgamentos dos 5 especialistas para os parâmetros do indicador econômico

ETAPA 3: CONVERSÃO DOS JULGAMENTOS EM NÚMEROS TRIANGULARES FUZZY										
ESPECIALISTA	C ₄₁ x C ₄₂			C ₄₁ x C ₄₃			C ₄₂ x C ₄₃			
	/	m	u	/	m	u	/	m	u	
1	1	1	1	1/6	1/5	1/4	1/6	1/5	1/4	
2	8	9	9	1/4	1/3	1/2	1/6	1/5	1/4	
3	1	1	1	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2	
4	1	1	1	1/8	1/7	1/6	1/6	1/5	1/4	
5	4	5	6	2	3	4	1	1	1	
Min (/), Max (u) e média geométrica (m)	1	2,14	9	0,13	0,39	4	0,17	0,31	1	

Tabela A4.11 – Etapa 4: Matriz de julgamento Fuzzy para as comparações dos indicadores, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas

	C ₁			C ₂			C ₃			C ₄		
	/	m	u	/	m	u	/	m	u	/	m	u
C ₁	1	1	1	0,25	2,41	9	1	3,74	9	0,13	1,81	9
C ₂	0,1	0,42	4	1	1	1	1	2,67	6	0,16	1,40	9
C ₃	0,1	0,27	1	0,17	0,37	1	1	1	1	0,11	1,25	9
C ₄	0,1	0,55	8	0,11	0,71	6,25	0,11	0,80	9,09	1	1	1

Tabela A4.12 – Etapa 4: Matriz de julgamento *Fuzzy* para os parâmetros do indicador técnico, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas

C₁₁			C₁₂			C₁₃					
	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
C₁₁	1	1	1		0,17	0,42	4		0,13	0,64	8
C₁₂	0,25	2,37	5,88		1	1	1		1	1,93	4
C₁₃	0,13	1,55	7,69		0,25	0,52	1		1	1	1

Tabela A4.13 – Etapa 4: Matriz de julgamento *Fuzzy* para os parâmetros do indicador social, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas

C₂₁			C₂₂			C₂₃					
	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
C₂₁	1	1	1		0,17	1,72	6		0,13	2,80	9
C₂₂	0,16	0,58	5,88		1	1	1		1	2,14	6
C₂₃	0,11	0,36	7,69		0,17	0,47	1		1	1	1

Tabela A4.14 – Etapa 4: Matriz de julgamento *Fuzzy* para os parâmetros do indicador ambiental, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas

C₃₁			C₃₂			C₃₃					
	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
C₃₁	1	1	1		2	4,90	9		2	4,36	8
C₃₂	0,11	0,20	0,5		1	1	1		0,25	0,64	1
C₃₃	0,13	0,23	0,5		1	1,55	4		1	1	1

Tabela A4.15 – Etapa 4: Matriz de julgamento *Fuzzy* para os parâmetros do indicador econômico, a partir da agregação dos julgamentos dos especialistas

C₄₁			C₄₂			C₄₃					
	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>		<i>I</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
C₄₁	1	1	1		1	2,14	9		0,13	0,39	4
C₄₂	0,11	0,47	1		1	1	1		0,17	0,31	1
C₄₃	0,25	2,54	7,69		1	3,27	5,88		1	1	1

Tabela A4.16 – Etapa 5: verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para a comparação dos indicadores

Matriz A				Soma	Avtov etor w	n	A x w	λ	λ_{\max}	IC	IR	RC
C ₁	C ₂	C ₃	C ₄									
C ₁	1	2,41	3,74	1,81	8,9528	0,4390	1,8878	4,30				
C ₂	0,42	1	2,67	1,40	5,4836	0,2689	1,0398	3,87	4,169	0,0563	0,89	0,06
C ₃	0,27	0,37	1	1,25	2,8882	0,1416	0,5474	3,86				
C ₄	0,55	0,71	0,80	1	3,0697	0,1505	0,6990	4,64				
TOTAL				20,3943								

Tabela A4.17 – Etapa 5: verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador técnico

Matriz A			Soma	Avtov etor w	n	A x w	λ	λ_{\max}	IC	IR	RC
C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃									
C ₁₁	1	0,42	0,64	2,066	0,1979	0,6016	3,03				
C ₁₂	2,37	1	1,93	5,30	0,5081	3 1,5457	3,04	3,00	0,003	0,52	0,006
C ₁₃	1,55	0,52	1	3,07	0,2939	0,8639	2,93				
TOTAL			10,43								

Tabela A4.18 – Etapa 5: Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador social

Matriz A			Soma	Avtov etor w	n	A x w	λ	λ_{\max}	IC	IR	RC
C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃									
C ₂₁	1	1,72	2,80	5,523	0,4989	1,5390	3,08				
C ₂₂	0,58	1	2,14	3,72	0,3363	3 0,9793	2,91	3,01	0,005	0,52	0,009
C ₂₃	0,36	0,47	1	1,82	0,1647	0,4996	3,03				
TOTAL			11,07								

Tabela A4.19 – Etapa 5: Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador ambiental

Matriz A			Soma	Auto vetor w	n	A x w	λ	λ_{max}	IC	IR	RC
C₃₁	C₃₂	C₃₃									
C₃₁	1	4,90	4,36	10,26	0,68		2,11	3,06			
C₃₂	0,20	1	0,64	1,85	0,12	3	0,38	3,10	3,01	0,007	0,52
C₃₃	0,23	1,55	1	2,78	0,18		0,53	2,87			0,01
TOTAL			14,89								

Tabela A4.20 – Etapa 5: Verificação da consistência a partir da matriz de julgamento fuzzy para os parâmetros do indicador econômico

Matriz A			Soma	Auto vetor w	n	A x w	λ	λ_{max}	IC	IR	RC
C₄₁	C₄₂	C₄₃									
C₄₁	1	2,14	0,39	3,53	0,29		0,82	2,83			
C₄₂	0,47	1	0,31	1,77	0,14	3	0,45	3,10	3,03	0,017	0,52
C₄₃	2,54	3,27	1	6,81	0,56		1,78	3,16			0,03
TOTAL			12,11								

Tabela A4.21 – Etapa 6: cálculo do Z_{ij}^a para os indicadores, a partir da equação 5.8

	ZL₁	ZL₂	ZL₃	ZL₄
ZL₁	1	1,32	2,36	0,96
ZL₂	0,26	1	1,83	0,78
ZL₃	0,18	0,27	1	0,67
ZL₄	0,33	0,41	0,45	1

Tabela A4.22 – Etapa 6: cálculo do Z_{ij}^a para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.8

	ZL₁₁	ZL₁₂	ZL₁₃
ZL₁₁	1	0,295	0,387
ZL₁₂	1,310	1	1,466
ZL₁₃	0,838	0,383	1

Tabela A4.23 – Etapa 6: cálculo do Z_{ij}^{α} para os parâmetros do indicador social, a partir da equação 5.8

	ZL₂₁	ZL₂₂	ZL₂₃
ZL₂₁	1	0,94	1,46
ZL₂₂	0,37	1	1,57
ZL₂₃	0,23	0,31	1

Tabela A4.24 – Etapa 6: cálculo do Z_{ij}^{α} para os parâmetros do indicador ambiental, a partir da equação 5.8

	ZL₃₁	ZL₃₂	ZL₃₃
ZL₃₁	1	3,45	3,17
ZL₃₂	0,15	1	0,44
ZL₃₃	0,17	1,27	1

Tabela A4.25 – Etapa 6: cálculo do Z_{ij}^{α} para os parâmetros do indicador econômico, a partir da equação 5.8

	ZL₄₁	ZL₄₂	ZL₄₃
ZL₄₁	1	1,57	0,26
ZL₄₂	0,29	1	0,24
ZL₄₃	1,39	2,13	1

Tabela A4.26 – Etapa 6: cálculo do Z_{ijr}^{α} para os indicadores, a partir da equação 5.9

	ZR₁	ZR₂	ZR₃	ZR₄
ZR₁	1	5,70	6,36	5,40
ZR₂	2,20	1	4,33	5,22
ZR₃	0,63	0,68	1	5,12
ZR₄	4,27	3,48	4,94	1

Tabela A4.27 – Etapa 6: cálculo do Z_{ijr}^{α} para os parâmetros do indicador técnico, a partir da equação 5.9

	ZR₁₁	ZR₁₂	ZR₁₃
ZR₁₁	1	2,210	4,322
ZR₁₂	4,126	1	2,966
ZR₁₃	4,622	0,758	1

Tabela A4.28 – Etapa 6: cálculo do Z_{ijr}^a para os parâmetros do indicador social, a partir da equação 5.9

	ZR₂₁	ZR₂₂	ZR₂₃
ZR₂₁	1	3,85	5,90
ZR₂₂	3,23	1	4,07
ZR₂₃	4,02	0,73	1

Tabela A4.29 – Etapa 6: cálculo do Z_{ijr}^a para os parâmetros do indicador ambiental, a partir da equação 5.9

	ZR₃₁	ZR₃₂	ZR₃₃
ZR₃₁	1	6,95	6,17
ZR₃₂	0,35	1	0,82
ZR₃₃	0,36	2,77	1

Tabela A4.30 – Etapa 6: cálculo do Z_{ijr}^a para os parâmetros do indicador econômico, a partir da equação 5.9

	ZR₄₁	ZR₄₂	ZR₄₃
ZR₄₁	1	5,57	2,19
ZR₄₂	0,73	1	0,65
ZR₄₃	5,11	4,57	1

Tabela A4.31 – Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os indicadores, a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11

	Z₁	Z₂	Z₃	Z₄	PESO LOCAL
Z₁	1	3,51	4,36	3,18	0,354
Z₂	1,23	1	3,08	2,99	0,242
Z₃	0,41	0,47	1	2,90	0,132
Z₄	2,30	1,94	2,70	1	0,272

Tabela A4.32 – Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador técnico, utilizando $Z_{ij\alpha}^{\lambda}$ a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11

	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	PESO LOCAL
Z_{11}	1	1,253	2,354	0,340
Z_{12}	2,718	1	2,216	0,391
Z_{13}	2,730	0,571	1	0,269

Tabela A4.33 – Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador social, utilizando $Z_{ij\alpha}^{\lambda}$ a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11

	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Peso Local
Z_{21}	1	2,4	3,68	0,435
Z_{22}	1,8	1	2,82	0,332
Z_{23}	2,12	0,52	1	0,233

Tabela A4.34 – Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador ambiental, utilizando $Z_{ij\alpha}^{\lambda}$ a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11

	Z_{31}	Z_{32}	Z_{33}	Peso Local
Z_{31}	1	5,2	4,67	0,676
Z_{32}	0,25	1	0,63	0,130
Z_{33}	0,27	2,02	1	0,194

Tabela A4.35 – Etapa 6 e 7: matriz defuzificada para os parâmetros do indicador econômico, utilizando $Z_{ij\alpha}^{\lambda}$ a partir da equação 5.10 e peso local a partir da equação 5.11

	Z_{41}	Z_{42}	Z_{43}	Peso Local
Z_{41}	1	3,57	1,22	0,373
Z_{42}	0,51	1	0,44	0,133
Z_{43}	3,25	3,35	1	0,494

Tabela A4.36 – Etapa 8: peso global a partir da equação 5.12

INDICADOR	Peso Local C_i	Parâmetros	Peso Local C_{ij}	Peso Global W_{ij}
Técnico	0,354	Complexidade de Transporte	0,340	0,12
		Segurança e Resiliência da ETAR	0,391	0,14
		Existência de Legislação	0,269	0,09
Social	0,242	Grau de Aceitação	0,435	0,11
		Grau de Necessidade % Coleta e Tratamento de Esgoto	0,332	0,08
		Risco para Saúde Pública	0,233	0,06
Ambiental	0,132	Consumo de Energia na ETAR	0,676	0,09
		Risco para o Ambiente	0,130	0,02
		Risco para o Ambiente	0,194	0,03
Econômico	0,272	Investimento Necessário	0,373	0,10
		Encargos de Operação e Manutenção	0,133	0,04
		Benefícios Econômicos	0,494	0,13