



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE DESSALINIZADORES NO SERTÃO
CENTRAL DO ESTADO CEARÁ, BRASIL

FORTALEZA

2024

JOÃO BATISTA DO SANTOS GURGEL

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE DESSALINIZADORES NO SERTÃO
CENTRAL DO ESTADO CEARÁ, BRASIL**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Waleska Martins Eloi.
Coorientador: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.

FORTALEZA

2024

G978a Gurgel, João Batista do Santos.
Avaliação da qualidade da água de dessalinizadores do Sertão Central do Estado do Ceará, Brasil / João Batista do Santos Gurgel. - 2024.
67 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Tecnologia em Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Waleska Martins Eloi.
Coorientação: Prof. Dr. Rinaldo dos Santos Araújo.

1. Água subterrânea. 2. Semiárido. 3. Monitoramento. 4. Osmose reversa. 5. Água potável. I. Título.
CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.003755/2024-45

Interessado: Waleska Martins Eloi

JOÃO BATISTA DO SANTOS GURGEL

“AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE DESSALINIZADORES NO SERTÃO CENTRAL DO ESTADO CEARÁ, BRASIL”

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 26/03/2024

Profa. Dra. Waleska Martins Eloi (Orientadora)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Lucas da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE Campus de Quixadá

Dra. Deborah Mithya Barros Alexandre
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH)



Documento assinado eletronicamente por Lucas da Silva, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, em 02/04/2024, às 21:37, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Waleska Martins Eloi, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, em 03/04/2024, às 09:50, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Deborah Mithya Barros Alexandre, Usuário Externo, em 04/04/2024, às 13:57, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador 6045551 e o código CRC F40D1B20.

“Tu tens fé, e eu tenho obras. Mostra-me a tua fé sem obras e eu te mostrarei a minha fé pelas minhas obras” - Tiago. 1:18.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me amparar nos momentos de dificuldades e ter me dado força para viver esta importante fase da vida.

A minha esposa Diana Maria da Costa Oliveira Gurgel e minhas filhas Júlia Oliveira Gurgel e Mariana Oliviera Gurgel pela paciência e por ter entendido a importância desse período de mudanças.

A minha orientadora professora Dra. Waleska Martins Eloi do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), pela condução das etapas necessárias para conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador professor Dr. Rinaldo dos Santos Araújo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) por me imbuir do espírito científico.

A Profa. Dra. Gloria Maria Marinho Silva, Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental (PGTGA) e aos professores: Dr. Hugo Leonardo de Brito Albuquerque, Dra. Najila Rejanne Alencar Julião Cabral; Dra. Rafaela Camargo Maia; Dra. Adriana Guimarães Costa Sabóia e Dr. Francisco Mauricio de Sá Barreto pela dedicação e acolhida aos mestrandos.

A Secretaria dos Recursos Hídricos em nome do ex-secretário, Sr. Francisco José Colho Teixeira e da ex-coordenadora da COINF (Coordenadoria de Infraestrutura), Sra. Mércia Cristina Manguiera Sales, por ter me apoiado, concedendo todo material e tempo necessário para dedicação ao curso de mestrado.

Ao Sr. Fábio Peixoto Cavalcante, Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental e consultor do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), pelo apoio.

A geógrafa, especialista em geoprocessamento Sra. Albeniza Barbosa Cavalcante, pelo fornecimento dos materiais que contribuíram para a elaboração desta dissertação.

RESUMO

A escassez de água é um problema que afeta diversas regiões do mundo, sendo intensificada em áreas semiáridas como o Sertão Central do Ceará, Brasil. Além da falta de água, essas regiões sofrem com a indisponibilidade de água potável para o consumo humano. Diante disso, torna-se fundamental o uso de tecnologia eficaz para suprir a demanda por água potável em diversas comunidades, como o uso da dessalinização da água, que surge como uma alternativa promissora. Nessa perspectiva, esta pesquisa se propõe a investigar os parâmetros da qualidade da água obtida por meio de dessalinizadores no Sertão Central do Ceará, avaliando a potabilidade após a dessalinização e a eficiência dos dessalinizadores analisados. A pesquisa foi quantitativa e a base de dados utilizada foi constituída a partir de visitas *in loco*, laudos e relatórios da qualidade da água de comunidades nos municípios de Banabuiú, Choró, Ibareta, Ibicuitinga, Milhã, Mombaça e Piquet Carneiro nos anos de 2020 a 2023. Para a análise experimental foram utilizados laudos de análises físico-químicas da água bruta e da água tratada obtida por osmose reversa (permeado). Os dados de qualidade da água bruta e das águas dessalinizadas foram analisados usando o programa QualiGraf segundo o método de Logan e a partir dos diagramas de Piper das amostras. O monitoramento foi executado para os parâmetros de: Na^+ (mg/L), K^+ (mg/L), Ca^{++} (mg/L), Mg^{++} (mg/L), Fe (mg/L), Cl^- (mg/L), CO_3^{2-} (mg/L), HCO_3^- (mg/L), SO_4^{2-} (mg/L), NO_3^- (mg/L), NO_2^- (mg/L), condutividade elétrica (CE), pH e turbidez (TU). Os resultados comprovaram que todas as amostras de água bruta não atenderam a legislação brasileira, enquanto as amostras dessalinizadas apresentaram conformidade legal. As águas brutas apresentaram excesso de sais tornando-as imprópria para o consumo humano. Em geral, os sistemas dessalinizadores apresentaram elevada eficiência na remoção de sais produzindo água de boa qualidade para o abastecimento humano.

Palavras-chave: Água subterrânea. Semiárido. Monitoramento. Osmose reversa. Água potável

ABSTRACT

Water scarcity is a problem that affects several regions of the world and is particularly pronounced in semi-arid areas such as the Central Sertão of Ceará, Brazil. In addition to the lack of water, these regions suffer from the unavailability of drinking water for human consumption. Given this, it is essential to use effective technology to meet the demand for drinking water in various communities, such as the use of water desalination, which appears as a promising alternative. From this point of view, this study aims to investigate the quality parameters of water obtained through desalination plants in the Central Sertão of Ceará, evaluating potability after desalination and the efficiency of the analyzed desalination plants. The research was quantitative, and the database used was constituted from field visits, reports and water quality reports from municipalities in the districts of Banabuiú, Choró, Ibareta, Ibicuitinga, Milhã, Mombaça and Piquet Carneiro in the years 2020 to 2023. For the experimental analysis, physico-chemical analysis reports of raw water and physico-chemical analysis reports of the water treated by reverse osmosis (permeated) were used. The quality data of raw water and the desalinated water were analyzed with the QualiGraf program according to the method of Logan and on the basis on the Piper diagrams of the samples. Monitoring was carried out for the parameters: Na^+ (mg/L), K^+ (mg/L), Ca^{++} (mg/L), Mg^{++} (mg/L), Fe (mg/L), Cl^- (mg/L), CO_3^{2-} (mg/L), HCO_3^- (mg/L), SO_4^{2-} (mg/L), NO_3^- (mg/L), NO_2^- (mg/L), electrical conductivity (EC), pH and turbidity (TU). The results showed that all raw water samples did not comply with Brazilian legislation, while the desalinated samples were legally compliant. The raw water had excess salts, making it unfit for human consumption. In general, the desalination systems showed high efficiency in removing salts, producing good quality water for human consumption.

Keywords: Subterranean water. Semiarid. Monitoring. Drink water. Reverse osmosis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Classificação dos processos de dessalinização.....	21
Figura 2 — Representação do processo de osmose.....	23
Figura 3 — Princípio da osmose: situação de equilíbrio.....	23
Figura 4 — Representação do processo de osmose reversa.....	24
Figura 5 — Tipos de membranas e suas características.....	25
Figura 6 — Componentes de uma membrana de osmose reversa típica.....	26
Figura 7 — Fluxograma da dessalinização por osmose reversa do Programa Água Doce..	28
Figura 8 — Poço que abastece o sistema padrão.....	32
Figura 9 — Conjunto de filtros do pré-tratamento do dessalinizador.....	32
Figura 10 — Reservatórios para água bruta, água doce e água do concentrado.....	32
Figura 11 — Dessalinizador de 1200 L/h.....	32
Figura 12 — Cocho para dessedentação animal.....	32
Figura 13 — Chafariz eletrônico.....	32
Figura 14 — Coleta de amostra de água bruta.....	32
Figura 15 — Coleta de amostra de água dessalinizada.....	32
Figura 16 — Visão geral do sistema de dessalinização do Programa Água.....	33
Figura 17 — Localização da região de planejamento do Sertão Central do Ceará.....	34
Figura 18 — Mapa de localização dos dessalinizadores no Sertão Central, Ceará, Brasil....	35
Figura 19 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizada (b) no poço do município de Banabuiú, Ceará.....	43
Figura 20 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizada (b) nos poços do município de Choró, Ceará.....	45
Figura 21 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizada (b) nos poços do município de Ibaretama, Ceará.....	48
Figura 22 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizada (b) nos poços do município de Ibicuitinga, Ceará.....	50
Figura 23 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizada (b) nos poços do município de Milhã, Ceará.....	53
Figura 24 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizada (b) nos poços do município de Mombaça, Ceará.....	55
Figura 25 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizada (b) no município de Piquet Carneiro, Ceará.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas e tratadas por dessalinização no município de Banabuiú, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	41
Tabela 2 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Choró, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	44
Tabela 3 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Choró, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	44
Tabela 4 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Ibaretama, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	47
Tabela 5 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Ibaretama, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	47
Tabela 6 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Ibicuitinga, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	49
Tabela 7 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Ibicuitinga, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	49
Tabela 8 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Milhã, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	51
Tabela 9 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Milhã, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	52
Tabela 10 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Mombaça, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	54

Tabela 11— Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Mombaça, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	54
Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Piquet Carneiro, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.....	57
Tabela 12— Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Piquet Carneiro, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABAS	Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
COINF	Coordenadoria de Infraestrutura
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
GED	Gerenciamento Eletrônico de Documentos
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAA	Índice de Condição de Acesso à Água do Semiárido
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
INEP	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial de Saúde
OR	Osmose Reversa
PAD	Programa Água Doce
PSA	Plano de Segurança da Água
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos
UD	Unidade Demonstrativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo geral.....	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	Escassez hídrica.....	18
3.2	Águas subterrâneas e salinidade.....	19
3.3	Sistema de dessalinização	20
3.3.1	<i>O fenômeno da Osmose e osmose reversa.....</i>	22
3.4	A dessalinização no Estado do Ceará.....	26
3.5	Sistema de dessalinização avaliado.....	28
3.5.1	<i>Captação e adução.....</i>	28
3.5.2	<i>Pré-tratamento.....</i>	29
3.5.3	<i>Dessalinização.....</i>	29
3.5.4	<i>Cloração.....</i>	30
3.5.5	<i>Retrolavagem.....</i>	31
3.5.6	<i>Água Doce ou Permeado.....</i>	31
3.5.7	<i>Concentrado salino.....</i>	31
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1	Área do estudo.....	34
4.2	Caracterização dos poços.....	36
4.3	Sistema de monitoramento	38
4.4	Caracterização analítica.....	38
4.5	Balanço iônico das águas.....	39

4.5.1	<i>Classificação iônica das águas subterrâneas.....</i>	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1	Avaliação físico-química e classificação iônica das águas.....	41
5.1.1	<i>Município de Banabuiú.....</i>	41
5.1.2	<i>Município de Choró.....</i>	44
5.1.3	<i>Município de Ibaretama.....</i>	46
5.1.4	<i>Município de Ibicuitinga.....</i>	49
5.1.5	<i>Município de Milhã.....</i>	51
5.1.6	<i>Município de Mombaça.....</i>	54
5.1.7	<i>Município de Piquet Carneiro.....</i>	56
6	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica é uma realidade enfrentada por muitas regiões áridas em todo o mundo, destacando a necessidade de soluções inovadoras para garantir o acesso à água potável. No Sertão Central do Ceará, a dessalinização surge como uma alternativa promissora para enfrentar esse desafio, oferecendo uma fonte importante de água doce. A dessalinização tem sido amplamente utilizada em áreas propensas à seca, demonstrando sua eficácia na produção de água de qualidade.

Estudos de Pinheiro (2018) e Júnior (2021) destacam a importância de avaliar a qualidade da água gerada por dessalinizadores, considerando variáveis como salinidade, teor de minerais e presença de contaminantes. Pinheiro (2018) indica a necessidade de monitorar parâmetros microbiológicos, e a utilização de esterilizantes químicos no pós-tratamento para garantir a segurança da água produzida.

Na região Nordeste do Brasil, devido à escassez de água potável, a população se utiliza de poços tubulares como fontes de águas, entretanto, a maioria, apresentam teores de sais acima do nível de potabilidade. Assim a dessalinização por osmose reversa surge como um processo que gera água de boa qualidade para o consumo humano tendo como fonte esses tipos de poços (MONTEIRO, 2009).

Diante disto, o uso de tecnologia eficaz para suprir a demanda por água potável, como o uso da dessalinização da água surge como uma alternativa promissora, que pode atenuar a indisponibilidade de água potável nas comunidades da região.

A existência de tecnologias para dessalinização da água despertou o interesse do Governo Federal Brasileiro, por meio do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2012) e outras instituições federais, estaduais e organizações da sociedade civil, de forma que em 2004 foi formulado e implementado em âmbito nacional, o “Programa Água Doce” (PAD).

Por diminuir a vulnerabilidades quanto ao acesso à água no Semiárido, o Programa Água Doce é considerado uma medida de adequação às mudanças climáticas (SAIA, 2018). Iniciativas como o Programa Água Doce promovem o uso sustentável da água e contribuem para o enfrentamento dos efeitos das mudanças climáticas.

Com a execução do Programa Água Doce, o Ministério de Meio Ambiente em parceria com instituições, onde destacam-se o BNDES, Petrobras, Fundação Banco do Brasil, Embrapa, Universidade Federal de Campina Grande, DNOCS e a CPRM, contribui com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS definem as prioridades e as pretensões globais para 2030 e procuram mobilizar os esforços globais ao redor de uma série comum de objetivos

e metas. Eles representam uma oportunidade para abolir a pobreza extrema e colocar o mundo numa trajetória sustentável (BRASIL, 2012)

O ODS nº 6 “Garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos, que trata dentre outros, o acesso universal e equitativo à água potável, o acesso ao saneamento, a eliminação de despejo de produtos químicos, o aumento da reciclagem e da reutilização segura da água, a implementação da gestão integrada dos recursos hídricos e a proteção dos ecossistemas relacionados com a água – como florestas, rios, aquíferos e lagos.

Nessa conjuntura, o Programa Água Doce também se enquadra ao ODS nº 1: Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares tendo em vista análise da pobreza de forma multidimensional. e ODS nº 17: Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2012).

O Estado do Ceará é dividido em 14 regiões de planejamento, a saber: Cariri, Centro Sul, Grande Fortaleza, Litoral Leste, Litoral Norte, Litoral Oeste/Vale do Curu, Maciço de Baturité, Serra da Ibiapaba, Sertão Central, Sertão de Canindé, Sertão dos Crateús, Sertão dos Inhamuns, Sertão de Sobral e Vale do Jaguaribe (IPECE, 2015) e dados do PAD no território cearense mostram a implantação de 252 sistemas de dessalinização em 44 municípios destas diversas regiões, sendo 24 dessalinizadores distribuídos em 13 municípios do sertão central cearense.

A qualidade da água é uma preocupação para as comunidades em regiões áridas, como o Sertão Central do Ceará. Nesse contexto, a dessalinização emerge como uma tecnologia para fornecer acesso à água potável na região, mitigando os impactos da escassez hídrica. Destaca-se a importância do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água, indispensável para avaliar se o recurso está adequado para o consumo humano, pois altos níveis de sais podem causar diversos problemas de saúde.

Nestes contextos, este estudo visa investigar a eficiência e a qualidade da água produzida por dessalinizadores no Sertão Central do estado do Ceará, avaliando a conformidade desta água com os padrões de potabilidade estabelecidos na legislação brasileira, por meio da Portaria GM/MS Nº 888 de 4 de maio de 2021.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência de dessalinizadores no Sertão Central do Estado do Ceará visando produção de água potável para suprir as demandas das comunidades locais.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar dados de caracterização físico-química das águas de poços e águas tratadas por dessalinização em diversos municípios do Sertão Central do Estado do Ceará entre os anos de 2020 e 2022.
- Avaliar, conforme os padrões da legislação vigente, a qualidade da água tratada proveniente dos sistemas de dessalinização no período temporal investigado.
- Realizar balanço iônico das águas brutas dos poços e tratadas por dessalinização para fins de classificação quanto a potabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Escassez hídrica

A demanda por água é amplamente influenciada pela população, por políticas de crescimento, urbanização, segurança alimentar, energética, globalização do comércio e aumento do consumo. Até 2050 a demanda global de água está projetada para crescer 55%, principalmente devido aos crescentes processos de fabricação, eletricidade térmica, geração e uso doméstico (UNESCO, 2015).

A escassez hídrica é um problema mundial, configurando-se como um dos grandes desafios para o século XXI. O Brasil mesmo com uma grande reserva de água doce, não consegue atender a toda demanda, enfrentando desafios para equacionar um melhor equilíbrio entre a disponibilidade hídrica existente e a demanda por múltiplos usos (CASTRO, 2022). De toda a água doce disponível no Brasil, 70% localizam-se na região Norte enquanto a região Nordeste possui 3% (CASTRO, 2022). O Semiárido Brasileiro se estende pelos nove estados da região Nordeste e pelo norte de Minas Gerais, totalizando 12% do território nacional. Ele abriga cerca de 28 milhões de habitantes divididos entre zonas urbanas (62%) e rurais (38%), sendo, portanto, um dos semiáridos mais povoados do mundo (IBGE, 2022).

O crescimento populacional em conjunto com a intensa urbanização, amplia as demandas dos setores agrícola, industrial e energético, podendo estas serem incrementadas segundo os padrões de consumo vigentes. Devido ao aumento da produção de alimentos e bens de consumo, recursos naturais são explorados, impactando os ecossistemas locais causando poluição, degradação e promovendo alterações climáticas. Assim a quantidade e a qualidade das águas ficam comprometidas, causando escassez hídrica (CANTELLE; LIMA; BORGES, 2018).

O desenvolvimento social e econômico mundial ocasiona um aumento na demanda por água, necessitando de um controle sistemático da qualidade das águas, a fim de garantir o bem-estar humano e o equilíbrio ecológico (LUCON, 2018). No caso do semiárido nordestino brasileiro, onde o desequilíbrio entre oferta e demanda de água é mais crítico, o contexto geológico, formado por rochas ígneas e metamórficas, com baixa permeabilidade, favorece a formação de solos pouco profundos e a existência de lençóis freáticos pouco expressivos, com elevada concentração salina, em função dos sais solúveis liberados pelas rochas.

Pinheiro (2018) destacam o agravamento de um problema no embasamento cristalino, visto que o solo da depressão sertaneja é raso, pedregoso e com pouca drenagem, afetando a quantidade e a qualidade da água subterrânea. Estima-se que há uma capacidade de extração de água subterrânea na ordem 250 milhões de metros cúbicos (PORTO, 2019).

De acordo com o Índice Municipal de Alerta (IPECE, 2022) em 2021 constatou-se que os municípios do Sertão Central, Mombaça, Pedra Branca, Choró, Quixadá, Quixeramobim e Banabuiú encontrava-se na classe de alta vulnerabilidade, com risco de chuvas abaixo da média local. Durante os anos de 2021 e 2022 os municípios que compõe o Sertão Central apresentaram uma situação relativamente melhor do que a condição medida em 2021, evidenciando uma diminuição da vulnerabilidade aos fatores climatológicos e agrícolas nestes municípios.

3.2 Águas subterrâneas e salinidade

Um aquífero é um reservatório subterrâneo de água, no entanto as condições geológicas interferem na qualidade, capacidade de armazenamento e velocidade de transmissão da água no seu meio. Os aquíferos podem ser classificados em razão da porosidade e da pressão de água exercida pela superfície (IRITANI; EZAKI, 2012). Com relação a porosidade, os aquíferos predominantes no semiárido cearense são aquíferos fraturados ou fissurais. A capacidade dessas rochas de acumularem água está associado à quantidade de fraturas, aberturas e intercomunicações, auxiliando a infiltração e o fluxo de água (SABINO, 2009).

As reservas de água subterrânea estão presentes, sobretudo em solos aluviões das calhas dos rios e nos riachos (PEREIRA, 2006). Esses depósitos representam uma boa alternativa como manancial (BRAGA, 2021), embora seja na maior parte salobras, típicas de solos denominado comumente de aquífero fissural. Essa é uma reserva estratégica principalmente nos longos períodos de estiagem e tem sua importância vinculada a questões hidrogeológica diante da predominância de rochas cristalinas (OLIVEIRA; FEITOSA, 1998). De acordo com Feitosa et al. (2008) os constituintes das águas subterrâneas são oriundos das interações entre a água e os diversos sólidos, líquidos e gases que ocorrem desde a área de recarga até e descarga. Nesse contexto a origem dos constituintes está associada a qualidade das águas de infiltração, ao tempo de transito e tipos litológicos atravessados.

Embora as águas subterrâneas sejam uma alternativa viável para garantir água as comunidades rurais do Nordeste, essas fontes hídricas apresentam, na maioria dos casos, restrições de uso para o consumo humano por serem salobras ou salinas necessitando de tratamento para torná-las potáveis (AYERS; WESTCOT, 1999).

Para muitas comunidades rurais do Nordeste brasileiro, a utilização de águas subterrâneas de poços tubulares muitas vezes é a única opção ao abastecimento d'água, garantindo a sua subsistência durante os períodos de seca.

Segundo Bastos (2004), a região semiárida nordestina apresenta risco de salinização, associado à elevada concentração de sais no perfil do solo, os quais podem ser absorvidos e transportados pela água até o lençol subterrâneo, podendo ocorrer de forma natural ou de forma induzida, tornando-se importante o manejo ambientalmente indicado de água e do solo visando o controle adequado da salinização. A condição de semiaridez, associado à natureza pouco permeável do solo, a ocorrência de rios e riachos temporários, resulta em reduzidas taxas de infiltração das águas de chuva (DE BRITTO et al., 2006). Embora apresente altos índices de sais dissolvidos, a água subterrânea tem se tornou uma alternativa para o abastecimento humano e dessedentação animal (PINHEIRO, 2018).

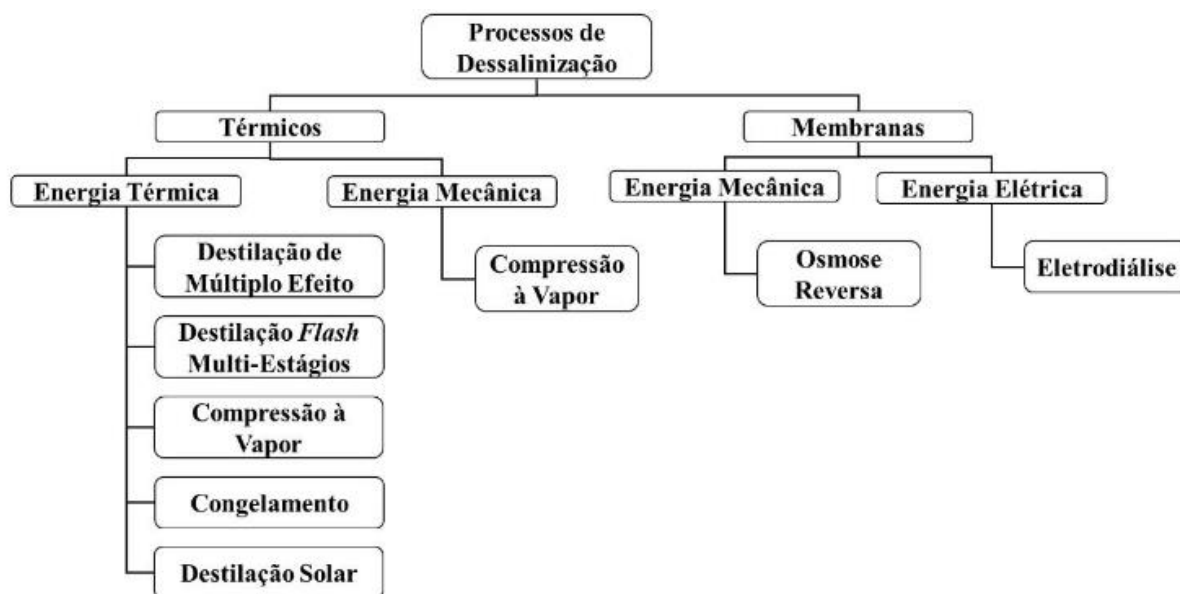
3.3 Sistemas de dessalinização

Gaio (2016) relata que a primeira usina de dessalinização foi instalada, nas Antilhas Holandesas, e opera desde 1928. Porém, no período dos anos 40, durante a segunda guerra mundial, a necessidade de água potável pelos militares em regiões áridas e em locais isolados, potencializou a necessidade da dessalinização. Observou-se também que após a guerra diversos países continuaram a desenvolver e aprimorar a tecnologia, destacando-se os Estados Unidos como um dos países que investiu bastante na tecnologia. A nível mundial a dessalinização vem aumentando exponencialmente desde 1960.

Segundo Torri (2015), a experiência com a dessalinização no Brasil inicia em 1970, no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), e em 1987 a Petrobras inicia o programa de dessalinização de água do mar visando atender as suas plataformas marinhas. Em 1997, o Governo Federal criou o Programa Água Boa (PAB) promovendo a instalação de dessalinizadores em todos os estados do semiárido e em 2003, esse programa passou a se chamar Programa Água Doce (PAD), o qual corrigiu falhas detectadas no PAB (AZEVEDO, 2012). Já em 1998, o Governo do Estado de Pernambuco, por meio da Secretaria dos Recursos Hídricos de Pernambuco decidiu utilizar essa tecnologia (TAVARES, 2009).

A dessalinização é um processo físico-químico de retirada de sais da água, tornando-a doce. Para tanto, diversas tecnologias são utilizadas para que a dessalinização de águas salgadas ou salobras aconteça. Na Figura 1 está a apresentado o fluxograma típico de um sistema de dessalinização.

Figura 1 — Classificação dos processos de dessalinização



Fonte: Siqueira (2022).

De acordo com Celli (2017), em um processo de dessalinização destaca-se que:

- a) a destilação solar utiliza-se da energia solar onde a água passa a vapor e se torna doce depois que condensa;
- b) na destilação multi-estágios: a água é aquecida até o estado de vapor e através de um sistema de resfriamento é realizada a condensação da mesma sem os sais;
- c) a eletrodiálise ocorre através de um sistema de cátodo e ânodo, chamado de pilha de membranas, fazendo com que sejam separados os sais da água;
- d) a osmose reversa está baseada no efeito da pressão da água sobre uma membrana polimérica, através da qual a água irá se difundir e os sais ficarão retidos;
- e) a destilação a vácuo ocorre ao submeter a água salgada ao vácuo a sua temperatura de ebulição diminui, evaporando a água a baixa temperatura, condensando-a em seguida sem a presença dos sais; e
- f) no congelamento a água é resfriada para formar cristais de gelo que são separados da salmoura.

O processo de destilação se dá quando a radiação solar, passa por entre uma cobertura transparente, aquece a água e o reservatório em uma temperatura superior à da cobertura. Os níveis de temperatura e o nível associado à pressão do vapor dentro do destilador causam a condensação do vapor de água na parte interna da cobertura transparente (MARINHO, 2012).

Durante a crise energética, ao final dos anos 50, houve um aumento na procura por processos de menor impacto ambiental e com menor consumo de energia para se utilizar na

dessalinização da água, que era purificada a partir de técnicas evaporativas com grande índice de consumo energético. Por este motivo, estudos voltados para a separação utilizando membranas cresceu em grande escala, se destacando o uso da osmose reversa e eletrodialise (ARAUJO; ROSA; OLIVEIRA, 2021).

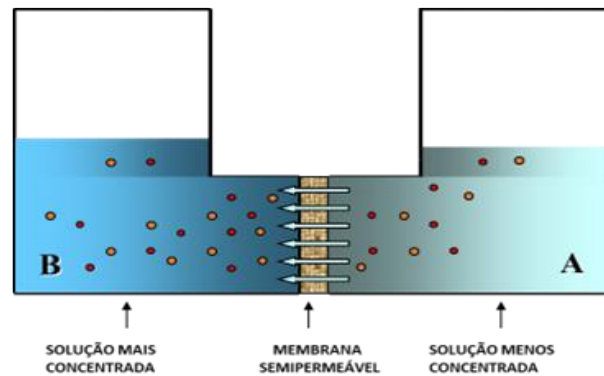
A eletrodialise (ED) utiliza como força motriz o potencial elétrico. A ED é uma tecnologia de separação por membrana que leva em conta a troca de íons eletricamente conduzida da qual é capaz de separar, concentrar e purificar íons selecionados de misturas aquosas, conforme foram citados nos estudos desenvolvidos por Alves, (2017) e Souza, (2011). Este campo de separações se expandiu muito com o desenvolvimento da tecnologia por membranas, passando a ser utilizado em indústrias com aplicações no processo fabril, no processamento de água potável para consumo humano e no tratamento de efluentes nas indústrias (ARAUJO; ROSA; OLIVEIRA, 2021).

Com o aumento da demanda por água potável nos últimos anos, as técnicas de dessalinização têm se aperfeiçoado o que representará uma das principais técnicas de tratamento fontes de recurso hídrico. Além de ser aplicada em águas oceânicas, a dessalinização pode ser útil também em águas subterrâneas continentais. Diversos países que possuem deficiência em produzir água potável, também com características de regiões áridas e semiáridas, já optaram por trabalhar com a tecnologia de dessalinização (ARAUJO; ROSA; OLIVEIRA, 2021).

3.3.1 O fenômeno da osmose e osmose reversa

A osmose é um fenômeno conhecido desde o fim do século XIX. A palavra osmose vem do grego “osmós” e significa “impulso”. Quando dois compartimentos, cada um contendo soluções com concentrações de sais diferentes, são separados por uma membrana semipermeável, há uma tendência natural do solvente (no caso a água) migrar da solução menos saturada para a solução mais saturada até que se consiga o equilíbrio de concentrações nas duas soluções (MOURA, 2008). A Figura 2 a seguir exemplifica este fenômeno.

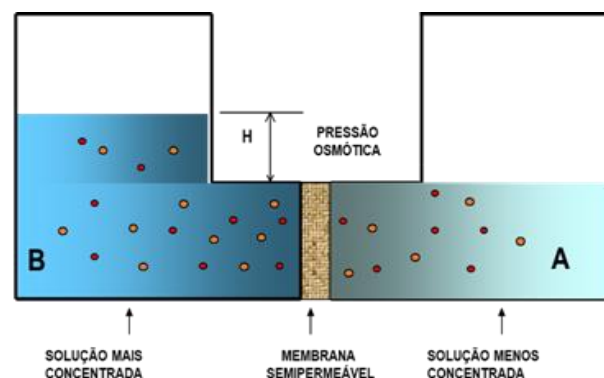
Figura 2 — Representação do processo de osmose



Fonte: Cavalcante (2018).

O solvente contido na solução A, que é a água fluirá através da membrana semipermeável em direção à solução B que é mais concentrada em sais. Esse fluxo permanecerá até atingir o equilíbrio, mesma concentração de sais em A e em B (CAVALCANTE, 2018), conforme a Figura 3.

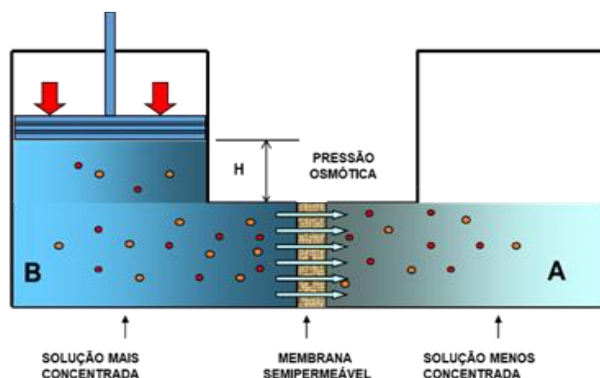
Figura 3 — Princípio da osmose: situação de equilíbrio



Fonte: Cavalcante (2018).

Nesta situação de equilíbrio, há um diferencial de pressão chamado de pressão osmótica e a concentração em ambas as soluções, neste momento, são iguais (CAVALCANTE, 2018). O princípio da osmose inversa ou reversa (OR) se dá com a aplicação de uma força para vencer a diferença de potencial representada pela pressão osmótica, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Representação do processo de osmose reversa



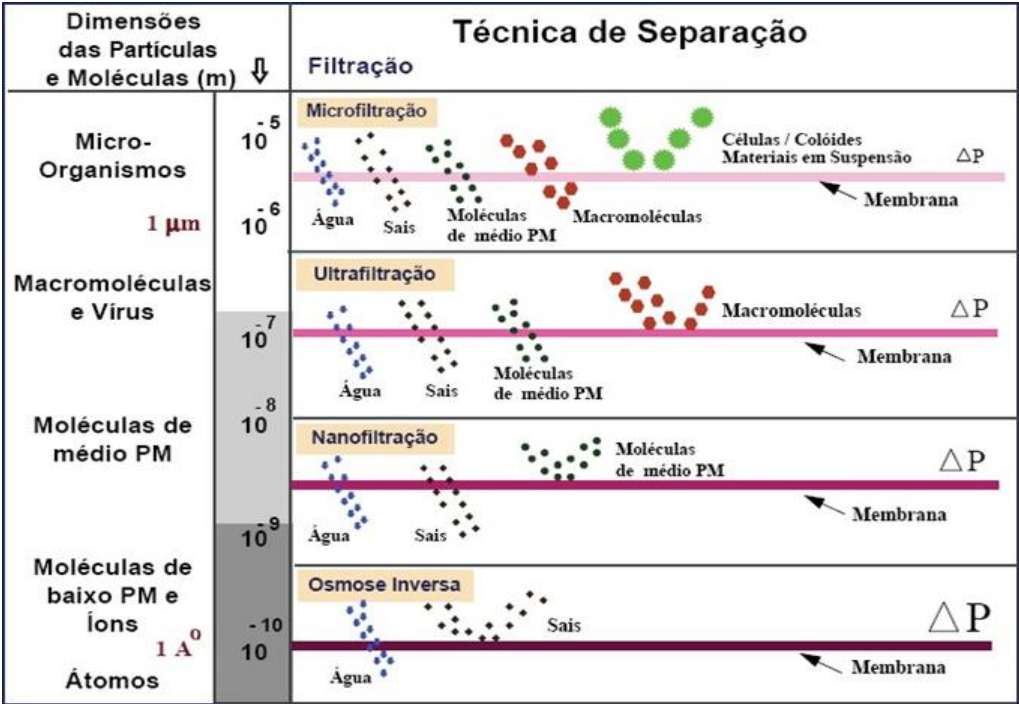
Fonte: Cavalcante (2018).

Na OR o solvente da solução B é forçado a migrar através da membrana semipermeável para a solução A (CAVALCANTE, 2018). Nos sistemas de osmose reversa, a bomba de alta pressão conhecida como *booster* é que exerce a pressão osmótica sobre as membranas.

A osmose é um processo essencial no controle da concentração de sais nas células de organismos vivos. Quanto maior for a diferença da concentração inicial entre os dois compartimentos, maior será a pressão criada que impedirá o transporte osmótico da água através da membrana (pressão osmótica). Na osmose a solução menos concentrada perde o seu volume, enquanto a mais concentrada ganha. Aplicando uma pressão superior à pressão osmótica, é possível inverter a direção do fluxo. A solução mais concentrada perde então seu volume, aumentando sua concentração. Simultaneamente, a solução diluída aumenta o seu volume, pois ela recebe água pura através da membrana, constituindo o processo chamado de osmose reversa (BRASIL, 2012).

Os processos de membrana representam um subconjunto importante dos processos de filtração, pois há muitos poucos poluentes encontrados na água que não podem ser removidos economicamente pela tecnologia de membrana. Uma membrana semipermeável, constitui-se de uma fina camada de material contendo orifícios, ou poros (Figura 5), que permite o fluxo de água, mas retém as espécies suspensas, coloidais e dissolvidas dentro do fluxo (dependendo do tamanho dos orifícios) (ARAUJO; ROSA; OLIVEIRA, 2021).

Figura 5 — Tipos de membranas e suas características

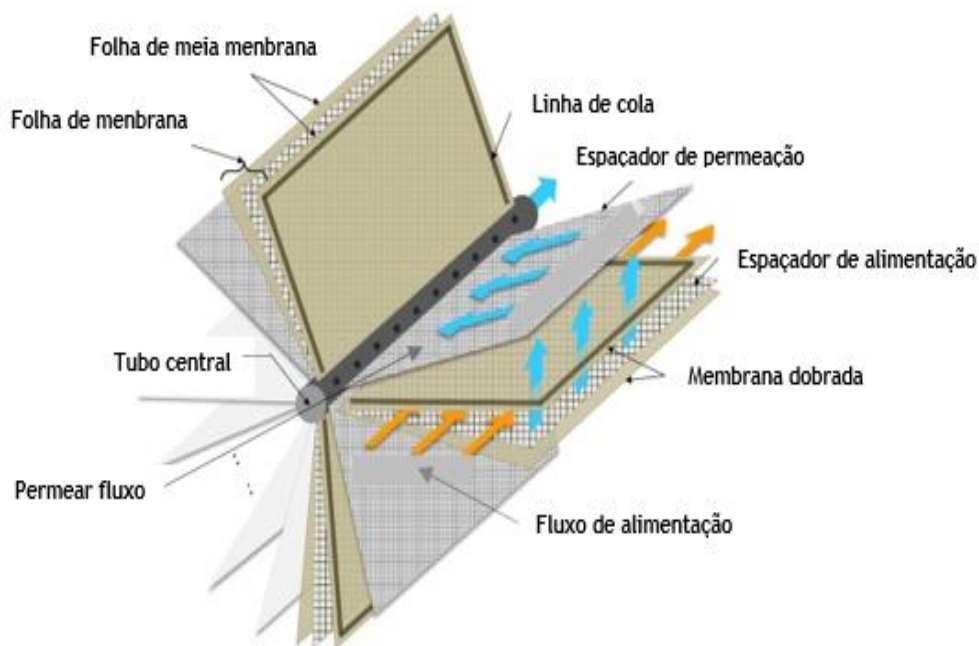


Fonte: Habert (2006).

A partir do processo de osmose reversa é possível gerar uma água equilibrada em sais, além de ser isenta de microrganismos e de poluentes. A água gerada por esse processo é, desta forma, apropriada ao consumo humano, pois se encontra em conformidade com Portaria GM/MS nº 888 de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) que dispõem sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade e disponibiliza as diretrizes do Plano de Segurança da Água (PSA) como princípio de múltiplas barreiras, boas práticas e gerenciamento de riscos (BRASIL, 2012).

As membranas utilizadas nas estações de tratamento apresentam características diversas podendo ser tubulares, fibras ocas, lâminas planas, enroladas em espiral etc. (Figura 6).

Figura 6 — Componentes de uma membrana de osmose reversa típica



Fonte: Cavalcante (2018).

O módulo espiral é o mais utilizado em aplicações que requerem pressões elevadas e intermediárias. Cada elemento contém de um pacote de membranas e espaçadores enrolados em volta de um tubo coletor de permeado central (LIRA, 2020). Os canais de alimentação são determinados por espaçadores e membranas dos dois lados, sendo que o canal de concentrado é mantido aberto por espaçadores no formato de telas. A superfície oposta das folhas de membrana onde fica situado a estrutura porosa de sustentação e por onde escorre o permeado é colocada em contato com um segundo espaçador formado por um tecido fino poroso. Atarefa é manter aberto o canal de água tratada (ALVES, 2013). Esse canal é fechado em três lados por linhas de cola. O lado aberto é encaixado dentro do tubo coletor encontrado no interior do elemento.

3.4 A dessalinização no Estado do Ceará

O semiárido brasileiro possui uma área de 1.182.697 km² (12% do território brasileiro), abrangendo 10 estados (AL, BA, CE, MG, PB, PE, PI, SE, RNEE e o Norte de Minas Gerais), com 1.262 municípios e 21 milhões de habitantes (12,3% da população do país), destes, 9 milhões vivem na zona rural (SUDENE, 2017). A escassez de água nesta região territorial pode ser explicada pela variabilidade temporal e espacial das precipitações, elevadas taxas de evaporação e evapotranspiração e pelas características geológicas, onde há predominância de

rochas cristalinas. Tais características explicam também a ocorrência de águas salobras e salinas na região, que impossibilitam a disponibilização destas águas para o consumo sem que haja o devido tratamento (SRH, 2023).

Particularmente, cerca de 75% da área do Estado do Ceará é formada por rochas do embasamento cristalino, apresentando solos com pequena espessura. A capacidade de armazenamento de água subterrânea é fornecida por arranjos estruturais, localizados nos contatos geológicos, por falhas e no manto de alteração. As fissuras e fraturas, como porosidade secundária, no qual a água circula, apresenta condutibilidade hidráulica não com base em porosidade primária das rochas, como no caso de aquíferos clásticos, mas pelos efeitos dos componentes estruturais alimentados por precipitação atmosférica, rede hidrográfica e as aluviões. Em regra, as águas subterrâneas do domínio cristalino são limitadas (IPECE, 2011).

Em geral, os poços nas zonas cristalinas apresentam Sólidos Totais Dissolvidos (STD) em torno de 2000 mg/L e 3000 mg/L e de forma mais pontual, casos com cerca de 5000 mg/L, e até superior a 10000 mg/L podem ser relatados (SRH, 2023).

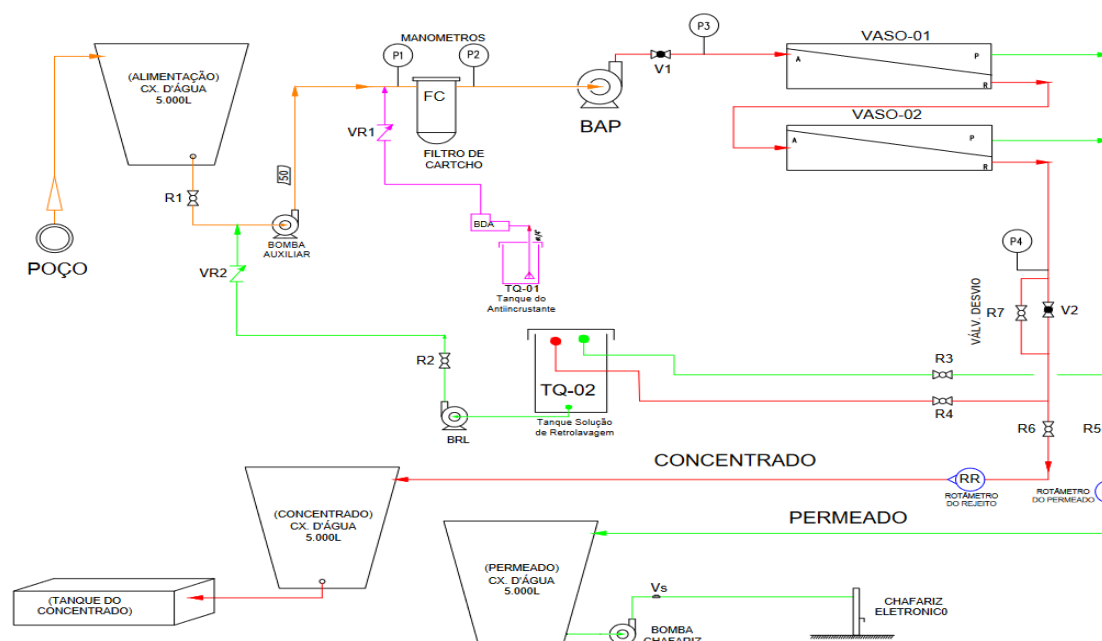
No Estado do Ceará, O Programa Água Doce (PAD) atua na recuperação e instalação de sistemas de dessalinização. O PAD implantou, como experiência-piloto 02 (duas) Unidades Demonstrativas (UD). A primeira UD foi instalada no Assentamento Mundo Novo no município de Russas com recursos da Fundação Banco do Brasil e atende a 120 famílias com água dessalinizada e beneficia ainda a comunidade com o aproveitamento do concentrado (efluente da dessalinização), com a produção de tilápia e com a produção de forrageira erva-sal (*Atriplex numulária*). A segunda UD foi instalada em Calumbi no município de Tauá e atende a 83 famílias nas mesmas condições (SRH, 2023).

A partir de 2010, as ações passaram a ser orientadas pelos Planos Estaduais de Implementação e Gestão do Programa Água Doce, tendo como meta atender um quarto da população rural do Semiárido, inicialmente a partir dos municípios mais críticos em cada estado e em áreas mais suscetíveis ao processo de desertificação.

Neste contexto, os critérios utilizados para a seleção das comunidades a serem beneficiadas envolveram: os índices de desenvolvimento humano (IDH); os altos percentuais de mortalidade infantil; os baixos índices pluviométricos e a dificuldade de acesso aos recursos hídricos. Para tanto foi desenvolvido o Índice de Condição de Acesso à Água do Semiárido (ICAA) a partir do cruzamento dos indicadores acima citados (BRASIL, 2012).

O esquema operacional de dessalinização nos moldes de operação do PAD está apresentado na Figura 7 a seguir.

Figura 7 — Fluxograma da dessalinização por osmose reversa do Programa Água Doce



Fonte: Cavalcante (2018).

3.5 Sistema de dessalinização avaliado

Os sistemas de dessalinização projetados e instalados em áreas difusas do estado do Ceará compreendem equipamentos com capacidade produtiva de 400 L/h, 800 L/h e 1.200 L/h, entretanto, para que haja uma compreensão completa do mesmo achou-se necessária uma descrição mais detalhada tendo como referência um dessalinizador de 800 L/h, conforme fluxograma da Figura 7.

3.5.1 Captação e adução

A água bruta é bombeada do poço profundo através de sistema de captação de águas tipo bomba submersa, potência de 1,5 a 2,0 CV, trifásica, 380 V com capacidade de bombeamento de até 4.000 L/h a uma altura manométrica total (AMT) de até 79 MCA, até um reservatório de vibra de vidro com tampa e capacidade de armazenamento de 5.000 L. As tubulações são de 6,0 m cada, de PVC rígido, roscado, diâmetro 1.1/2" com luvas simples do mesmo diâmetro, curva longa rosca macho/fêmea, diâmetro 1.1/2" em ferro galvanizado (FG); luva de união em FG diâmetro 1.1/2"; registro de gaveta diâmetro 1.1/2"; manômetro escala de 0 a 7 bar (GED, 2023).

3.5.2 Pré-tratamento

Por meio de uma bomba auxiliar de água bruta tipo bomba centrífuga, normalmente de um estágio, com a função de deslocar a água de alimentação que vem, por gravidade, do reservatório de água bruta até o conjunto de filtros de cartuchos de polipropileno expandido com poros de 5 μ m, para a entrada da bomba de alta pressão booster, garantindo um suprimento a esta, suficiente e com pressão adequada, evitando possíveis cavitações (RODRIGUES NETO, 2005). Esta filtração reduz a turbidez da água e retém o material sólido em suspensão. A pressão de entrada P1 e saída P2 do conjunto de filtros é medida por manômetros instalados no painel de comando.

Após a filtração e com o auxílio de uma bomba dosadora tipo bomba de diafragma com vazão de 0,5 a 1,0 L, e pressão de trabalho de 125 psi que dosa 1 mL de solução (anti-incrustante e água doce) a cada 3 s é aplicado o Flocon 260 para evitar a saturação das membranas (GED, 2023).

3.5.3 Dessalinização

Após o processo de filtração, a água bruta alimenta uma bomba de alta pressão (*booster*) tipo bomba centrífuga horizontal de múltiplos estágios cuja função é o deslocamento do fluido (água salobra) através do sistema e principalmente das membranas que ao oferecerem resistência a este deslocamento, gerando a pressão necessária e suficiente para promover a permeação da água através dos poros da membrana, por pressão e difusão. O difusor da *booster* é fabricado em aço inox 316 que por sua vez, proporciona uma pressão superior a 17 kgf/cm². As pressões de entrada P3 e saída P4 do conjunto de vasos permeadores é medida através de manômetros instalados no painel de controle (GED, 2023).

O processo de dessalinização acontece no interior dos vasos de alta pressão que são tubos de fibra de vidro reforçado onde estão instaladas as membranas. Em suas extremidades existem duas peças chamadas espelhos ou cabeçote que são fixados através de molas helicoidais de aço inox ou travas de fixação. As membranas de osmose reverso ficam instaladas interior dos vasos de alta pressão. A membrana utilizada no PAD tem as seguintes características:

Membranas de osmose inversa para água salobra (BW) com até 10.000 ppm de sais (NaCl), com característica de alta pressão e alta rejeição; material construtivo em Poliamida-Polisulfona com revestimento em fiberglass, pressão máxima de trabalho 600 psi (41 bar), área

ativa de 85 ft² (7.9 m²), vazão de 2.600 GPD (410 L/h), tamanho nominal: 4" x 40", taxa de rejeição estabilizada máxima de 99,7% e rejeição mínima de sais de 99,5% (GED, 2023).

Membranas de osmose inversa para água de alimentação padrão rede pública e salobra com até 2.000 ppm de sais (NaCl), com característica de baixa pressão; material construtivo em Poliamida-Polisulfona com revestimento em fiberglass, pressão máxima de trabalho 600 psi (41 bar), área ativa de 78 ft² (7.2m²), vazão máxima de 2.400 GPD (380 L/h), tamanho nominal: 4" x 40", taxa de rejeição estabilizada de 99,2% (GED, 2014).

O quadro de comando é constituído de gabinete em termoplástico antichamas, com disjuntor geral tripolar de 10 A; relé falta de fase; chave magnética com rele de sobrecarga compatível com a amperagem do motor da bomba submersa; rele de nível; 03 (três) eletrodos de nível com rabicho; barramento tipo cindal ou equivalente; cabeamento numerado e nas cores padrão normatizado; botão liga-desliga; sinaleira com diodo emissor de luz verde de operação da bomba e sinaleira com diodo emissor de luz amarela indicadora de quadro energizado (GED, 2023).

3.5.4 Cloração

Após o processo de dessalinização, a água do permeado segue para um reservatório de vibra de vidro com tampa e capacidade de armazenamento de 5.000 L que recebe a água doce resultante do processo de dessalinização por osmose reversa. Durante o trajeto, e com o auxílio de uma bomba dosadora de cloro (pós-tratamento), que é uma bomba dosadora eletromagnética, de diafragma com deslocamento positivo, para solução de cloro orgânico, com fluxo ajustável, força e pulsos indicados por diodo emissor de luz, proteção IP65, filtro em polipropileno, válvulas labiais em EPDM, válvula de injeção em polipropileno, diafragma em EPDM, cabeçote em polipropileno, *nipples* em polipropileno e vedações em EPDM. Vazão máxima de 10 litros/hora com ampla escala de regulação do fluxo desde 0 até 100%. A pressão máxima de trabalho é de 4 a 13 bar (GED, 2014).

Esta bomba necessita de um recipiente de polietileno (bombona) com capacidade para 50 L e tem a função de dosar uma solução (cloro orgânico e água doce) para garantir a qualidade da água doce até o consumidor final;

3.5.5 Retrolavagem

A retrolavagem é realizada no dia a dia para lavagem das membranas com água dessalinizada (permeado) após o processo de dessalinização, evitando que as membranas pernoitem com a água salobra. A bomba de retrolavagem é uma bomba centrífuga que deve ter seus componentes inertes à corrosão, já que, em algumas ocasiões, pode deslocar fluidos corrosivos. A retrolavagem deve ser realizado após a última operação do dessalinizador (GED, 2023). Este processo é eficiente para impedir a deposição do sal na superfície das membranas, diminuindo-se assim, o rendimento da permeação.

3.5.6 Água doce ou permeado

Após o processo de dessalinização por osmose reversa, a água tratada segue para um reservatório de fibra de vidro com tampa e capacidade de armazenamento de 5.000 L interligada ao chafariz eletrônico que é equipado com uma bomba centrífuga de mono estágio, de baixa potência, normalmente de 0,5 CV a 1,0 CV e com componentes inertes a reação com a água do permeado. Esse sistema tem a função de liberar 20 L de água doce mediante a inserção de uma ficha ranhurada (GED, 2023).

3.5.7 Concentrado salino

Após o processo de dessalinização por osmose reversa, a água do concentrado segue para um reservatório de fibra de vidro com tampa e capacidade de armazenamento de 5.000 L. Esse reservatório está conectado a um cocho para dessedentação animal (GED, 2023). O excedente do concentrado segue para um tanque de contenção revestido com uma geomembrana com capacidade de 400.000 L (GED, 2014).

As Figuras 8 a 15 mostram imagens dos diferentes componentes e procedimentos relacionado aos sistemas de dessalinização sob análise neste estudo.

Figura 8 — Poço que abastece o sistema no padrão PAD



Fonte: COINF/SRH (2018).

Figura 10 — Reservatórios para água bruta, água doce e água do concentrado



Fonte: COINF/SRH (2018).

Figura 12 — Cocho para dessedentação animal



Fonte: COINF/SRH (2018).

Figura 14 — Coleta de amostra de água bruta



Fonte: COINF/SRH (2018).

Figura 9 — Conjunto de filtros do pré-tratamento do dessalinizador



Fonte: COINF/SRH (2018).

Figura 11 — Dessalinizador de 1200 L/h



Fonte: COINF/SRH (2018).

Figura 13 — Chafariz eletrônico



Fonte: COINF/SRH (2018).

Figura 15 — Coleta de amostra de água dessalinizada



Fonte: COINF/SRH (2018).

A Figura 16 apresenta a imagem frontal do sistema de dessalinização usado no Programa Água Doce.

Figura 16 — Visão geral de um sistema de dessalinização do Programa Água Doce



Fonte: COINF/SRH (2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área do estudo

A área do estudo corresponde a região de planejamento do sertão central do Estado do Ceará com uma área territorial aproximada de 16.014,77 km² e uma população de 387.164 habitantes. A densidade demográfica em 2014 era de 24,18 habitantes/km².

O sertão central encontra-se entre os paralelos 04°05'49" a 03°18'35" de latitude sul e os meridianos 38°38'20" a 39°17'34" de longitude oeste de Greenwich. É composto por treze municípios: Banabuiú, Choró, Deputado Irapuan Pinheiro, Ibaretama, Mombaça, Pedra Branca, Piquet Carneiro, Quixadá, Ibicuitinga, Quixeramobim, Senador Pompeu, Solonópole e Milhã (IPECE,2015).

A Figura 17 mostra as mesorregiões do Estado do Ceará com destaque para o sertão central.

Figura 17 — Localização da região de planejamento do sertão central do Ceará



Fonte: IPECE (2015).

O sertão central cearense apresenta relevo predominantemente plano e aberto, com serras pouco elevadas ou muito abruptas, sendo composto por depressões sertanejas e maciços residuais. Já o clima caracteriza-se como tropical quente semiárido, apresentando precipitação média de aproximadamente 793 mm concentrada entre os meses de janeiro a abril. A temperatura média varia entre 24° e 28° C e a vegetação é representada por caatinga arbustiva densa, caatinga arbustiva fechada, caatinga arbustiva aberta, floresta caducifolia espinhosa, floresta mista dicotillo-palmácea e floresta subcaducifolia tropical pluvial (GOMES, MEDEIROS, ALBURQUERQUE, 2010).

Notadamente, o Programa Água Doce (PAD) implantou 252 sistemas de dessalinização em 44 municípios do estado do Ceará e desse quantitativo 7 estão inseridos no Sertão Central.

Segundo o Índice Municipal de Alerta (IMA), que é um instrumento para orientações preventivas sobre as adversidades climáticas do Estado do Ceará, em 2020, constatou-se que 23 municípios se encontram na classe de alta vulnerabilidade do IMA, os quais estão situados principalmente nas regiões de planejamento do Cariri, Centro Sul, Sertão Central, Sertão dos Crateús e Vale do Jaguaribe (IPECE, 2020).

Em 2021, constatou-se que 30 municípios estiveram na classe de alta vulnerabilidade, sendo que os municípios mais vulneráveis se situam, em sua maioria, nas regiões de planejamento do Sertão Central, Sertão de Canindé, Sertão dos Inhamuns e Litoral Oeste/Vale do Curu (IPECE, 2021).

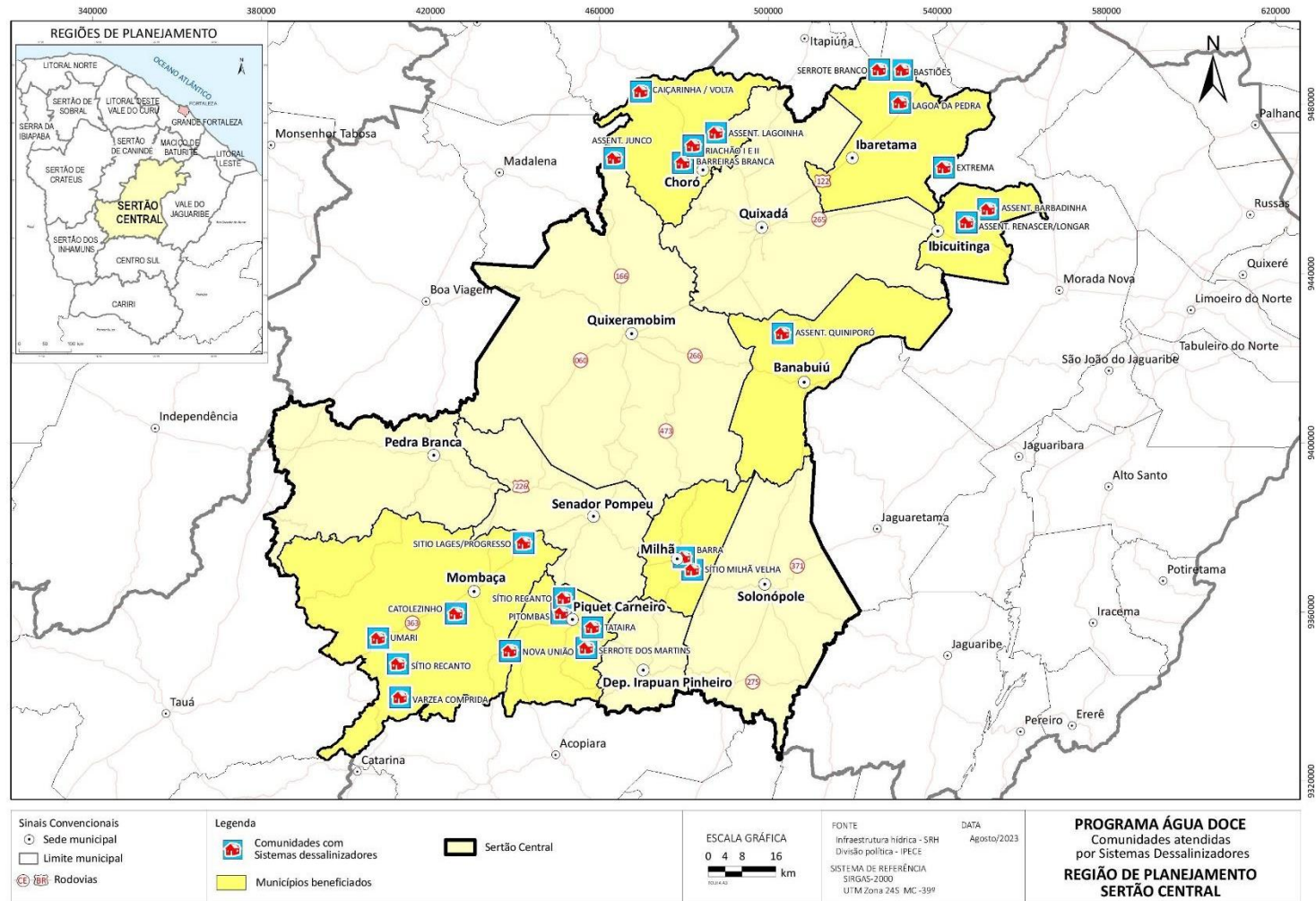
Em 2022, constatou-se que 22 municípios estiveram na classe de alta vulnerabilidade. Os municípios mais vulneráveis neste período situam-se, em sua maioria, nas regiões de planejamento do Sertão Central, Sertão de Canindé, Sertão dos Inhamuns e Cariri (IPECE, 2022).

Para este trabalho foi feito o recorte do monitoramento da qualidade da água bruta e do permeado dos sistemas de dessalinização do Sertão Central em diversas localidades situadas nas cidades de Banabuiú, Choro, Ibaretama, Ibicuitinga, Milhã, Mombaça e Piquet Carneiro nos anos de 2020, 2021 e 2022. As amostras de água bruta foram coletadas no chafariz de água bruta e as amostras de água do permeado no chafariz eletrônico.

Particularmente, as localidades selecionadas se encontram em região de clima semiárido, sendo a caatinga, a vegetação predominante. A maior parte da população vive na zona rural, tem renda baseada na agricultura familiar com criação de caprinos, ovinos e pequenos comércios.

A Figura 18 apresenta o mapa de localização das comunidades nas áreas dos municípios contemplados com o PAD no Sertão Central do Ceará.

Figura 18— Mapa de localização dos dessalinizadores no Sertão Central, Ceará, Brasil



Fonte: SRH/PAD (2023).

4.2 Caracterização dos poços

Os dados dos poços, números de famílias beneficiadas, capacidade dos equipamentos dos sistemas de dessalinização deste estudo estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 — Caracterização dos poços e dessalinizadores no Sertão Central do Ceará no âmbito do Programa Água Doce avaliados nesta pesquisa

Município/ Assentamento		Nº de famílias	Coordenadas dos poços		Dados do poço			Sistema de dessalinização			
								Capacidade (L/h)	Vazão (L/h)		Taxa de recupera ção (%)
			S	W	Profundidade (m)	Vazão (m³/h)	STD (mg/L)		Alimentação	Concentrado	
Banabuiú	Quiniporó	20	05° 11' 42.33"	38° 58' 11.78"	55,00	1,000	3.997,53	400	1.180	780	33,90%
Choró	Junco	26	04° 49' 9.87"	39° 19' 44.39"	60,00	5,000	1.957,04	800	2.290	1.490	34,93%
Choró	Lagoinha	22	04° 45' 53.93"	39° 06' 42.19"	71,00	1,800	2.434,93	800	2.290	1.490	34,93%
Choró	Barreiras Branco	75	04° 49' 46.53"	39° 10' 56.12"	63,00	1,750	1.448,82	800	2.350	1.550	34,04%
Choró	Caiçarinha	21	04° 40' 37.93"	39° 16' 21.70"	61,00	12,000	1.752,24	400	1.180	780	33,90%
Choró	Riachão	54	04° 47' 34.95"	39° 09' 38.06"	50,00	4,090	1.426,08	800	2.350	1.550	34,04%
Ibaretama	Extrema	41	04° 50' 23.36"	38° 37' 31.11"	56,00	2,90	2.738,34	800	2.300	1.500	34,78%
Ibaretama	Serrote Branco	25	04° 37' 50.01"	38° 45' 51.84"	52,00	4,00	1.494,33	400	1.140	740	35,09%
Ibicuitinga	Barbadinha	22	04° 55' 43.15"	38° 31' 51.93"	42,00	6,000	9.360,43	400	1.200	800	33,33%
Ibicuitinga	Renascer	47	04° 57' 25.22"	38° 34' 35.76"	42,50	2,900	3.056,93	800	2.350	1.550	33,33%
Milhã	Barra	152	05° 42' 00.51"	39° 09' 44.67"	51,00	5,660	9.831,00	1.200	2.610	1.410	45,98%
Milhã	Sítio Milhã Velha	48	05° 40' 23.94"	39° 10' 50.72"	55,00	1,492	1.994,97	800	2.350	1.550	34,04%
Mombaça	Catolezinho	50	05° 47' 37.09"	39° 40' 06.50"	60,00	3,225	745,75	400	1.210	810	33,06%
Mombaça	Nova União	190	05° 52' 26.63"	39° 33' 10.72"	66,00	3,947	1.071,82	1.200	2.730	1.530	43,96%
Mombaça	Sítio Lages	24	05° 38' 34.25"	39° 31' 22.79"	37,00	2,054	781,30	400	1.210	810	33,06%
Mombaça	Sítio Recanto	38	05° 54' 02.76"	39° 47' 31.35"	32,00	2,631	533,06	400	1.210	810	33,06%
Mombaça	Umari	80	05° 50' 45.75"	39° 50' 04.49"	42,00	5,607	777,32	400	1.210	810	33,06%
Mombaça	Várzea Comprida	41	05° 58' 22.33"	39° 47' 17.56"	42,00	5,633	1.089,27	400	1.210	810	33,06%
Piquet carneiro	Pitombas	19	05° 47' 35.03"	39° 26' 32.09"	60,00	3,986	1.304,69	400	1.210	810	33,06%
Piquet carneiro	Serrote dos Martins	62	05° 52' 03.08"	39° 23' 23.56"	42,00	3,858	1.084,72	800	2.420	1.620	33,06%
Piquet carneiro	Sítio Recanto	20	05° 45' 40.07"	39° 26' 14.29"	60,00	4,615	1.501,92	400	1.210	810	33,06%
Piquet carneiro	Tataíra	31	05° 49' 24.44"	39° 22' 34.77"	60,00	6,818	1.441,23	400	1.210	810	33,06%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

No Quadro 1 verifica-se que nos municípios e suas localidades um quantitativo de 1.108 famílias beneficiadas com o sistema de dessalinização do PAD, notadamente em uma região onde a disponibilidade hídrica é crítica. A água proveniente desses sistemas é essencial para a

subsistência das comunidades locais, destacando a importância de compreender os parâmetros físico-químicos e microbiológicos. O acesso a água potável envolve além da sobrevivência questões socioeconômicas, assim soluções para a implementação sustentável dessa tecnologia são de extrema importância em regiões como o Sertão Central do Ceará.

Os poços que abastecem os sistemas de dessalinização do PAD no Sertão Central cearense dos municípios estudados têm profundidade média de 52,7 m e vazão variando entre 1,0 m³/h a 12 m³/h. Os dessalinizadores de 400 L/h foram projetados para operar com recuperação média de 35% e possuem dois filtros de cartucho no pré-tratamento e duas membranas.

Os dessalinizadores de 800 L/h foram projetados para operar com recuperação média de 40% e possuem três filtros de cartucho para o pré-tratamento e quatro membranas. Os dessalinizadores de 1.200 L/h foram projetados para operar com recuperação média de 45% e possuem quatro filtros de cartucho no pré-tratamento e seis membranas. As membranas do PAD têm vida útil médio de 6 anos, mas esse período é determinado pela qualidade da água de alimentação, presença de anti-incrustantes, limpeza química, manutenção e operação correta dos sistemas.

Os dessalinizadores do PAD utilizam filtros em polietileno de 5 micras no pré-tratamento, evitando assim problemas como a incrustação das membranas, ou seja, a formação indesejável de depósitos na superfície desse material, incluindo escamação (inorgânica), incrustação (orgânica e coloidal) e bioincrustação (bactérias, vírus e parasitas).

A durabilidade dos filtros depende da qualidade da água bruta no início do processo, podendo durar semanas. O processo requer o uso de anti-incrustante (Flocon[®] 260) aplicado com uma bomba dosadora diretamente nos vasos permeadores, evitando que os sais se prendam na superfície, causando a saturação das membranas. As partículas do anti-incrustante não conseguem passar pelas membranas, sendo eliminadas juntamente com o rejeito.

O processo de osmose reversa remove sólidos totais dissolvidos (STD) com concentrações acima de 45.000 mg/L podendo ser aplicado eficientemente na dessalinização de águas salinas e salobras (YOUNOS; TULOU, 2005). Assim como todos os outros processos de dessalinização, a osmose reversa necessita de um pré-tratamento da água de entrada (água bruta), o qual é essencial para assegurar um alto desempenho e maior durabilidade do sistema.

Os corpos d'água do território nacional seguem classificação e padrões de qualidade determinados pela Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL/CONAMA, 2005). Esta resolução classifica as águas do Território Nacional em doces (salinidade 30‰) e indica seus usos preponderantes (BRASIL/CONAMA, 2005).

4.3 Sistema de monitoramento

O monitoramento da qualidade de água, com coleta, transporte e análises físico-químicas foi realizado por um laboratório terceirizado dentro do contrato de manutenção preventiva dos sistemas de dessalinização. Todos os dados e informações gerados nos processos de monitoramento e de manutenção dos sistemas implantados são encaminhados ao Banco de Dados do Programa Água Doce. Os dados das amostras de água bruta e do permeado foram coletados e arquivados entre 2020 e 2022 e tabulados para a realização desta pesquisa.

Para o estudo foram selecionados os laudos da qualidade correspondente a 57 amostras de água bruta e 57 da água tratada por dessalinização (permeado) no Assentamento de Quiniporó em Banabuiú; Assentamento Junco, Lagoinha, Barreiras Branco, Caiçarina, Riachão I e Riachão II no município de Choró; Assentamentos de Extrema e Serrote Branco em Ibaretama; Assentamento Barbadinha e Renascer em Ibicuitinga; Assentamentos de Barra e Sítio Milhã Velha no município de Milhã; Assentamentos de Nova União, Sítio Lajes e Várzea Comprida em Mombaça e por fim Assentamentos de Pitombas, Serrote dos Martins, Sítio Recanto e Tataíra em Piquet Carneiro.

Em termos físico-químicos foram avaliados os parâmetros de: Na^+ (mg/L), K^+ (mg/L), Ca^{++} (mg/L), Mg^{++} (mg/L), Fe (mg/L), Cl^- (mg/L), CO_3^{2-} (mg/L), HCO_3^- (mg/L), SO_4^{2-} (mg/L), NO_3^- (mg/L), NO_2^- (mg/L), condutividade elétrica (CE), pH e turbidez (TU).

O programa QualiGraf foi a ferramenta empregada para auxiliar na parte gráfica das análises mais usuais de qualidade de amostras d'água. Segundo a FUNCEME (2023) este software foi desenvolvido no ano de 2001 como uma ferramenta para uso interno no Departamento de Recursos Hídricos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), o software recebeu sua última atualização no ano de 2014, ampliando a gama de opções para análises gráficas.

A partir deste software é possível gerar o diagrama de Piper para classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto aos íons predominantes, balanço iônico; classificação das águas pelos sólidos totais; classificação das águas para fins de irrigação etc.

4.4 Caracterização analítica

As análises de caracterização físico-química para Na^+ (mg/L), K^+ (mg/L) foram realizadas por fotometria de chama (SMWW – 3500), Ca^{++} (mg/L) e Mg^{++} (mg/L) foram determinados por titulometria de complexação com EDTA (SMWW – 3500), Fe por

espectrofotometria (SMWW – 3500, método da fenantrolina), Cl^- (mg/L) foi avaliado por titulação com nitrato de prata (SMWW – 4500), CO_3^{2-} (mg/L) e HCO_3^- (mg/L) foram estimado por volumetria de neutralização (SMWW – 2320), SO_4^{2-} , NO_3^- e NO_2^- (mg/L) foram determinados por espectrofotometria (SMWW – 4500), condutividade elétrica (CE) (SMWW – 2510) e pH (SMWW – 4500) foram determinados por análise direta e turbidez (TU) foi avaliada por nefelometria (SMWW – 2130). Todas as análises seguiram os métodos oficiais descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2023).

Particularmente, os valores de referência para os parâmetros analíticos neste estudo estão em conformidade com a legislação vigente que adota os seguintes limites (VMP): NO_2^- (1 mg/L), NO_3^- (10 mg/L), Cl^- (250 mg/L), Fe (0,3 mg/L), Na^+ (200 mg/L), STD (500 mg/L) e TU (5 mg/L).

4.5 Balanço iônico das águas

Em uma análise hidroquímica completa, a concentração total de íons positivos (cátions) deve ser aproximadamente igual à concentração de íons negativos (ânions), sendo o desvio percentual dessa igualdade (sd) determinado pelo coeficiente de erro da análise.

Em tempo, o balanço iônico (BI) pode ser definido a partir da estatística de Logan (1965), descrito na Equação 1 (BI).

$$\text{BI (\%)} = \left[\frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cátions}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cátions}} \right] \times 100 \quad (1)$$

O balanço iônico (BI) segundo esta metodologia fica definido quando se verifica que a soma dos ânions é aproximadamente igual à soma dos cátions em mEq/L, resultando num coeficiente de erro máximo de 10% (LOGAN, 1965), o qual foi adotado como referência de caracterização e aceitação neste trabalho.

4.5.1 Classificação iônica das águas subterrâneas

Para a classificação iônica das águas coletas e tratadas foi utilizado o Diagrama de Piper. Neste diagrama os valores dos principais constituintes estão representados em unidades percentuais para cátions e ânions, permitindo uma identificação das fácies hidroquímicas. O losango situado entre os 8 triângulos dos cátions e dos ânions representa a composição conjunta

dos cátions e ânions que irá permitir uma correlação com o tipo litológico representativo do sistema aquífero. O tipo de água resulta da proporção dos principais constituintes dissolvidos.

Para a maior parte das águas subterrâneas naturais, Hem (1985) estabeleceu uma relação do tipo $STD \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \epsilon \times CE \text{ (}\mu\text{S.cm}^{-1}\text{)}$, onde a CE (condutividade elétrica) da água multiplicada por um fator (ϵ) que varia entre 0,55 e 0,75, a qual gera uma boa estimativa dos sólidos totais dissolvidos (STD). Segundo Custodio e Llamas (1983) a condutividade elétrica (CE) guarda uma estreita relação com STD a 18 °C, sendo o valor de ϵ adotado de 0,74.

Assim, para as águas onde os íons dominantes são HCO_3^- e Cl^- o valor é normalmente inferior a 0,55, já para águas salinas o fator é, usualmente, maior que 0,75 e para águas ácidas, normalmente, é menor que 0,55 (CARACAS, 2013).

O software QualiGraf calcula os STD empregando um valor de 0,65 (ϵ); considerado bom para a região Nordeste, tipicamente de clima quente (HEM *apud* CARACAS, 2013).

Assim com base nestas equações foi definida a classificação das águas em estudo, conforme a Resolução N° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que considera água doce aquela cuja salinidade é inferior a 0,5 ‰ (500mg/L), salobra até 30 ‰ (30.000 mg/L) e salgada com valores iguais ou superiores a 30‰ (BECKER, 2008).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação físico-química e classificação iônica das águas

5.1.1 Município de Banabuiú

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises físico-químicas das amostras de água bruta do poço do PAD no município de Banabuiú coletados ao longo de 3 anos.

Tabela 1 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas e tratadas por dessalinização no município de Banabuiú, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Água bruta																	
Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
QN1	12.2020	1318,00	26,40	624,65	1619,18	3055,22	2,00	545,63	10,00	4,16	0,05	0,10	7376,00	8,80	0,65	39,96	Magnesiânica cloretada
QN1	02.2021	1100,00	25,70	577,84	2277,15	3573,52	57,10	490,76	17,10	3,51	0,05	0,10	7360,00	8,70	0,10	40,86	Magnesiânica cloretada
QN1	03.2022	765,00	21,50	373,70	825,68	1818,71	2,00	381,75	10,00	3,52	0,05	0,10	5353,00	6,74	0,86	35,11	Magnesiânica cloretada
Água dessalinizada																	
QN1	12.2020	12,00	1,00	2,00	37,39	18,46	2,00	15,90	10,00	0,10	0,05	0,10	51,05	8,30	0,13	55,80	Magnesiânica mista
QN1	02.2021	8,30	1,00	9,46	27,58	17,67	10,00	16,75	10,00	0,10	0,05	0,10	55,17	9,00	0,10	40,82	Magnesiânica mista
QN1	03.2022	10,40	1,00	2,00	19,06	33,19	2,00	13,31	10,00	0,10	0,05	0,10	59,54	7,65	0,37	20,03	Magnesiânica cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: QN: Quiniporó.

O monitoramento das águas brutas no poço no assentamento Quiniporó na cidade de Banabuiú apresentou no período em estudo altas concentrações de magnésio e cloretos (média Mg⁺⁺: 1.574,00 mg/L e Cl⁻: 2815,82 mg/L), águas salobras com níveis moderados de sal (média Na⁺: 1.061,00 mg/L). Em geral, pode-se verificar que nas três amostras do único poço analisado, a concentração de cloretos foi maior do que o valor máximo estabelecido para o consumo humano pela resolução CONAMA 357/2005 ($\leq 250,0$ mg/L). A condutividade elétrica elevada (média de 6.696,3 μ S/cm) e o valor de pH de 8,08 indicam aumento de alcalinidade das amostras.

Em relação ao pH, Todas as amostras apresentaram-se em conformidade com o valor recomendado Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. As águas subterrâneas que apresentam pH ácido remetem a indícios de contaminação dos poços tubulares por fossas e esgotos domésticos, o que não foi observado nas amostras dessa localidade. Vale ressaltar que o pH das águas naturais influencia na solubilidade de compostos contendo metais traços como

Cd, Cu e Pb, sendo esta fração solúvel e biodisponível para interagir com organismos vivos (HU, BALASUBRAMANIAN, 2003; CABRAL, 2007; FONTENELLE, 2009).

Segundo Esteves (1988), nas águas naturais a dissociação de íons H^+ oriundos de ácidos carbônicos tem potencial para reduzir o valor do pH das águas, porém os CO_3^{2-} e HCO_3^- podem aumentar os valores de pH para a faixa alcalina.

Em relação ao nitrato (NO_3^-) as amostras de água bruta não atenderam ao parâmetro da legislação vigente conforme Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021). A distribuição de nitratos em águas de abastecimento público acima dos valores máximos permitidos pode ocasionar problemas de saúde como a metahemoglobina, que pode levar crianças à asfixia. A doença é letal quando 70% da hemoglobina do corpo é convertida em metahemoglobina (VILLANUEVA *et al.*, 2014).

Notadamente, considerado os valores de BI nenhuma das amostras atende ao balanço iônico de Logan ($BI < 10\%$), ratificando a necessidade de tratamento adequado das águas dos poços na comunidade em estudo na cidade de Banabuiú para oferta a população.

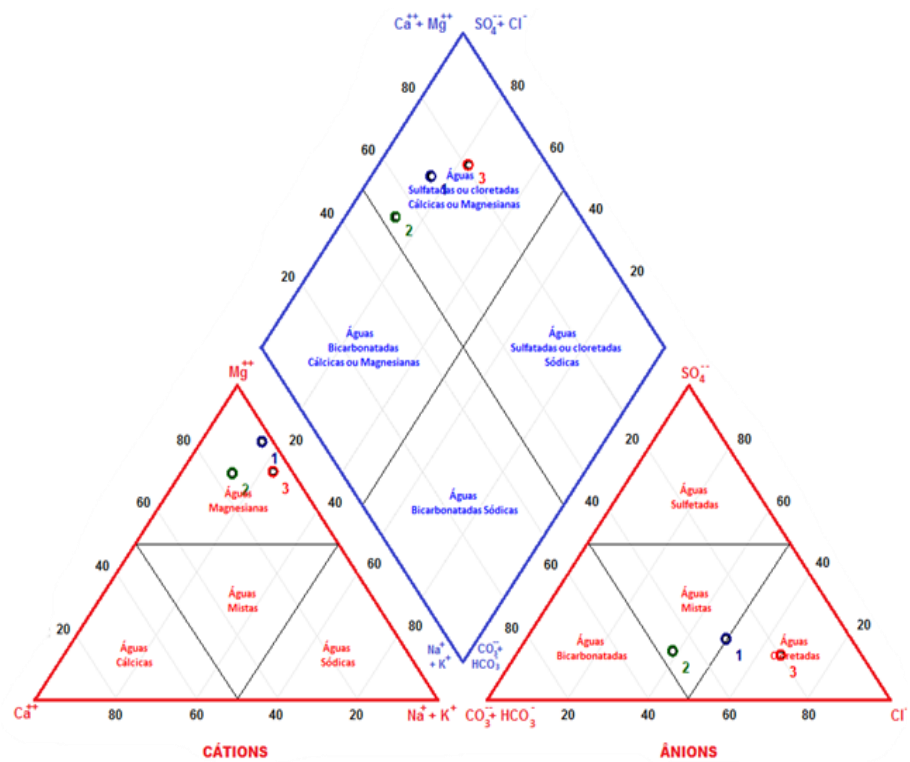
Assim, quanto a potabilidade todas as amostras após dessalinização (Tabela 1) atendem a legislação vigente para os parâmetros de: Na^+ , Fe, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- e turbidez, conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), considerados os Valores Máximos Permitidos de cada espécie química/propriedade e a incerteza dos métodos utilizados.

Os diagramas de Piper das águas brutas e após dessalinização na localidade de Quiniporó, Banabuiú estão apresentados na Figura 19.

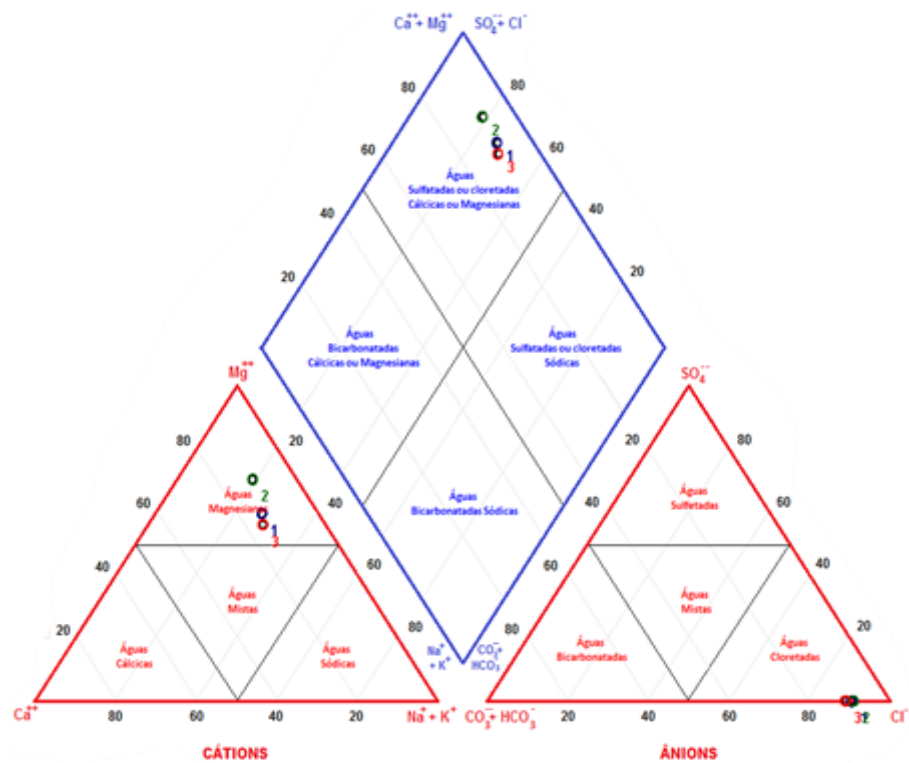
O diagrama de Piper da Figura 19, mostra durante todo o período em estudo, que 100% das águas brutas podem ser classificadas como “magnesianas cloretadas”, enquanto 67% mostraram-se do tipo “magnesiana mista” e 33% como “magnesiana cloretada”. Assim, infere-se que após tratamento o cátion predominante nas águas brutas foi o Mg^{++} (100%) enquanto nas águas tratadas, do tipo mista, a prevalência foi apenas de 67%. Essa mudança de abundância de composição catiônica magnesiana (águas brutas) para magnesiana e sódica (águas tratadas) caracteriza a transformação da água salobra/dura para água potável. A média de STD das amostras de água tratada foi 35,9 mg/L, o que as caracteriza como “água doce”, de acordo com a Resolução Nº 357 de 2005 do CONAMA.

Figura 19 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizadas (b) no poço do município de Banabuiú, Ceará

a)



b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.1.2 Município de Choró

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras de água bruta dos poços no município de Choró ao longo dos 3 anos de monitoramento.

Tabela 2 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Choró, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
AJ1	11.2020	765,00	7,40	591,83	867,34	1.911,44	2,00	473,55	189,18	4,64	0,28	0,10	6227,00	8,20	0,88	34,33	Magnesiana Cloretada
AJ2	01.2021	974,00	8,60	475,16	1751,65	3.824,05	2,00	464,69	251,37	4,96	0,05	0,05	6932,00	8,70	0,42	27,06	Magnesiana Cloretada
AJ3	04.2022	971,00	6,50	444,89	1619,17	2.911,98	2,00	480,90	139,76	11,76	0,05	0,10	6597,00	7,80	0,43	36,04	Magnesiana Cloretada
AL1	11.2020	885,00	24,70	1.687,74	2753,03	3.966,57	2,00	315,70	69,94	4,14	0,05	0,11	10630,00	7,60	0,33	49,37	Magnesiana Cloretada
AL2	01.2021	1.000,00	26,70	1.735,56	2.712,05	3.946,50	2,00	348,83	60,85	2,73	0,05	0,05	10.500,00	8,00	0,25	49,88	Magnesiana Cloretada
AL3	04.2022	1.230,00	20,50	1.747,33	1.909,78	4.813,56	2,00	223,31	28,95	10,86	0,32	0,10	11.680,00	7,60	0,50	36,10	Magnesiana Cloretada
BB1	11.2020	444,00	5,00	299,99	861,21	1.210,44	2,00	299,19	165,20	11,95	0,05	0,11	3824,00	8,80	1,16	42,42	Magnesiana Cloretada
BB2	01.2021	545,00	5,20	511,40	855,69	1.706,27	2,00	408,83	223,78	5,50	0,05	0,05	3826,00	8,40	0,23	33,58	Magnesiana Cloretada
BB3	04.2022	538,00	4,80	463,26	932,64	1.487,25	2,00	294,67	96,23	4,28	0,05	0,34	4222,00	7,80	0,87	43,27	Magnesiana Cloretada
CA1	11.2020	219,00	2,60	189,74	351,01	425,56	2,00	313,21	99,62	0,10	0,05	0,10	1346,00	8,10	0,36	42,64	Magnesiana Cloretada
CA2	01.2021	335,00	3,50	161,07	783,21	817,00	2,00	240,21	117,53	0,10	0,05	0,05	1936,00	8,40	0,10	49,41	Magnesiana Cloretada
CA3	04.2022	303,00	3,00	169,38	932,23	720,28	2,00	237,54	81,90	1,00	0,05	0,10	1531,00	7,60	0,92	58,22	Magnesiana Cloretada
RI1	11.2020	244,00	1,90	571,42	453,05	686,52	2,00	445,96	147,56	3,63	0,05	0,10	2658,00	8,30	0,31	43,91	Mista Cloretada
RI2	01.2021	282,00	2,10	295,97	1046,96	875,21	2,00	432,83	109,66	6,06	0,05	0,05	2753,00	8,20	0,10	53,67	Magnesiana Cloretada
RI3	04.2022	335,00	2,10	644,48	4.176,79	1.096,68	2,00	480,70	107,05	2,59	0,05	0,10	3180,00	7,00	0,29	80,94	Magnesiana Cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: AJ - Assentamento Junco, AL - Assentamento Lagoinha, BB - Barreiras Branco, CA - Caiçarinha e RI - Riachão.

Tabela 3 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas dos poços em estudo no município de Choró, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
AJ1	11.2020	7,00	1,00	2,00	33,87	16,86	2,00	21,54	10,00	0,10	0,05	0,10	44,40	7,60	1,61	48,90	Magnesiana Mista
AJ2	01.2021	11,40	1,00	6,44	19,12	16,46	2,00	12,20	10,00	0,10	0,05	0,05	56,90	9,40	0,27	44,01	Magnesiana Mista
AJ3	04.2022	17,50	1,00	2,00	31,42	26,46	2,00	11,62	10,00	0,10	0,05	0,10	56,06	6,80	0,62	48,24	Magnesiana Cloretada
AL1	11.2020	25,90	1,00	14,89	35,10	37,13	2,00	20,13	10,00	0,10	0,05	0,10	155,30	7,80	0,74	48,65	Magnesiana Cloretada
AL2	01.2021	26,20	1,00	5,83	30,60	27,70	2,00	18,00	10,00	2,81	0,05	0,05	121,60	8,50	0,46	49,24	Magnesiana Cloretada
AL3	04.2022	27,90	1,00	11,02	21,63	40,22	2,00	22,85	10,00	0,17	0,05	0,30	109,60	6,80	0,43	33,35	Mista Cloretada
BB1	11.2020	13,70	1,00	2,00	37,34	20,07	2,00	22,55	10,00	1,27	0,05	0,10	74,50	8,90	0,60	51,60	Magnesiana Mista
BB2	01.2021	8,50	1,00	2,00	17,71	12,24	2,00	13,44	10,00	0,10	0,05	0,05	36,31	8,70	0,30	39,80	Magnesiana Mista
BB3	04.2022	15,50	1,00	2,00	27,95	31,67	2,00	19,64	0,78	0,10	0,05	0,10	51,27	6,80	0,78	40,95	Magnesiana Cloretada
CA1	11.2020	2,60	1,00	2,00	33,87	5,01	2,00	20,13	10,00	0,10	0,05	0,10	19,44	7,30	0,26	60,42	Magnesiana Bicarbonatada
CA2	01.2021	4,20	1,00	2,00	16,71	5,42	2,00	13,24	10,00	0,10	0,05	0,05	20,12	9,90	0,36	44,59	Magnesiana Mista
CA3	04.2022	4,40	1,00	2,00	43,67	19,17	2,00	16,43	10,00	0,10	0,05	0,01	18,65	6,80	0,40	56,54	Magnesiana Mista
RI1	11.2020	3,90	1,00	2,00	32,85	7,42	2,00	17,11	0,18	0,10	0,05	0,18	23,77	7,70	0,10	68,50	Magnesiana Bicarbonatada
RI2	01.2021	6,60	1,00	2,00	41,07	9,83	2,00	22,13	10,00	0,10	0,05	0,05	28,60	8,80	0,14	61,11	Magnesiana Mista
RI3	04.2022	8,90	1,00	2,00	2,00	17,92	2,00	21,24	10,00	0,10	0,05	0,10	24,80	6,80	0,51	24,99	Sódica Mista

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: AJ - Assentamento Junco, AL - Assentamento Lagoinha, BB - Barreiras Branco, CA - Caiçarinha e RI - Riachão.

A Tabela 3 mostra que o monitoramento nos Assentamentos Junco (AJ) e Lagoinha (AL) e comunidades Barreiras Branco (BB), Caiçarinha (CA) e Riachão (RI) revelou altas concentrações de magnésio e cloretos (média Mg^{++} : 1.467,05 mg/L e Cl^- : 2.026,62 mg/L), águas salobras com níveis elevados de sal (média Na^+ : 604,67 mg/L), condutividade elétrica elevada (média CE: 5.189,47 $\mu S/cm$) e média de pH de 8,03.

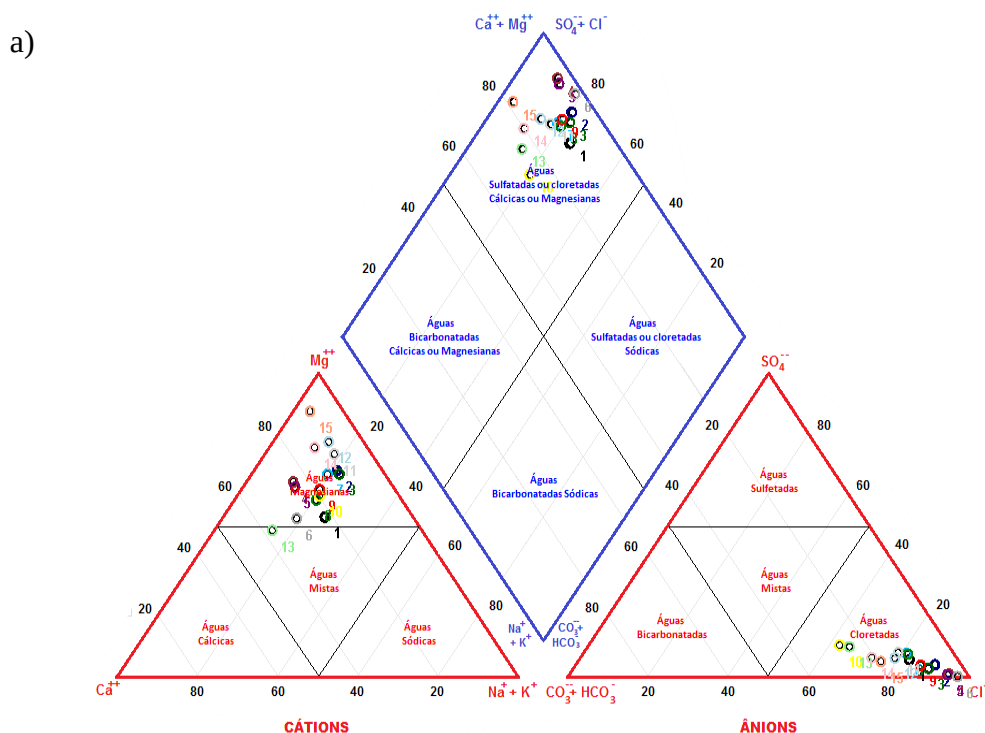
Particularmente, o Assentamento Lagoinha (AL) apresentou as maiores variações de Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} e Cl^- com valores bem acima da média das outras localidades.

Notadamente, nenhum dos poços atende aos balanços iônicos de Logan (1965) para BI, comprovando a necessidade de tratamento adequado para as águas dos poços das comunidades em estudo no município de Choró.

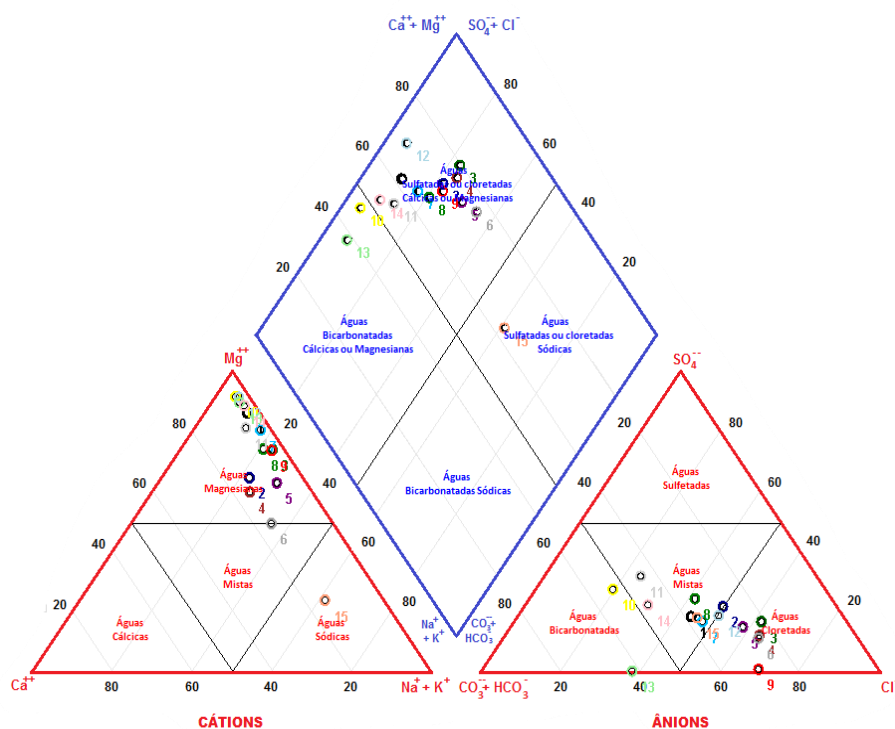
Quanto a potabilidade todas as amostras após dessalinização (Tabela 3) atendem a legislação vigente para os parâmetros de: Na^+ , Fe , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- e turbidez, conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), considerados os Valores Máximos Permitidos de cada espécie química/propriedade e a incerteza dos métodos utilizados.

Os diagramas de Piper das águas brutas e após dessalinização na localidade de Choró estão apresentados na Figura 20.

Figura 20 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizadas (b) nos poços do município de Choró, Ceará



b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O diagrama de Piper das águas após dessalinização (Figura 20b) mostra que 47% das águas são classificadas como “magnesiana mista”, 27% são “magnesianas cloretadas”, 13% são “magnesianas bicarbonatadas”; 6,5% “cloretadas mista” e 6,5% “sódica mista”. Após tratamento o cátion predominante nas águas foi o Mg^{++} com frequência de 87% enquanto o ânion predominante foi o Cl^- (53% de prevalência). A média de STD das amostras de água tratada foi de 36,46 mg/L, o que as caracteriza como “água doce”, de acordo com a Resolução Nº 357 de 2005 do CONAMA.

5.1.3 Município de Ibaretama

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras de água bruta dos poços no Município de Ibaretama ao longo dos 3 anos de monitoramento. Particularmente, os dados apresentados referem-se somente as localidades de Extrema e Serrote Branco.

Tabela 4 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Ibaretama, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
EX1	11.2020	854,00	6,60	1618,35	1399,98	2553,38	2,00	336,84	47,72	15,22	0,05	0,10	9105,00	8,30	1,41	49,60	Mista Cloretada
EX2	02.2021	1800,00	7,20	948,31	2089,90	4857,29	10,00	336,41	43,45	17,18	0,05	0,10	9295,00	8,40	0,26	34,88	Magnésiana Cloretada
EX3	03.2022	1250,00	9,10	810,42	1409,51	2432,07	2,00	292,50	43,23	13,67	0,05	0,10	9975,00	7,60	0,39	47,89	Mista Cloretada
SB1	11.2020	950,00	28,90	1714,27	1387,74	3274,03	2,00	135,90	264,56	0,10	0,05	4,44	8182,00	7,30	45,53	41,43	Magnésiana Cloretada
SB2	02.2021	2810,00	22,20	2043,60	1900,65	6791,15	10,00	149,58	332,58	0,10	0,05	3,62	8241,00	7,70	95,00	30,90	Mista Cloretada
SB3	03.2022	737,00	33,10	892,62	2022,64	2895,49	2,00	120,24	258,46	1,00	0,05	0,10	9143,00	7,37	124,00	46,48	Magnésiana Cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: EX - Extrema e SB - Serrote Branco.

Tabela 5 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas dos poços em estudo no município de Ibaretama, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
EX1	11.2020	14,10	1,00	39,59	28,97	37,13	2,00	25,16	10,00	0,10	0,05	0,10	123,50	8,30	0,10	48,49	Mista Cloretada
EX2	02.2021	17,20	1,00	8,25	65,23	42,51	10,00	28,55	10,00	0,10	0,05	0,10	100,30	8,90	0,21	49,57	Magnésiana Cloretada
EX3	03.2022	23,90	1,00	2,00	9,62	33,63	2,00	13,93	10,00	0,10	0,05	0,10	117,00	7,30	0,42	14,80	Sódica Cloretada
SB1	11.2020	17,20	1,00	8,36	25,10	43,96	2,00	15,10	10,00	0,10	0,05	0,10	139,30	6,40	0,16	29,76	Magnésiana Cloretada
SB2	02.2021	21,90	1,00	2,00	25,97	40,85	10,00	14,06	10,00	0,10	0,05	0,10	108,70	8,30	0,29	25,10	Magnésiana Cloretada
SB3	03.2022	45,60	1,80	2,00	2,00	84,52	2,00	9,77	10,00	0,10	0,05	0,10	253,60	8,34	0,45	10,27	Sódica Cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: EX - Extrema e SB - Serrote Branco.

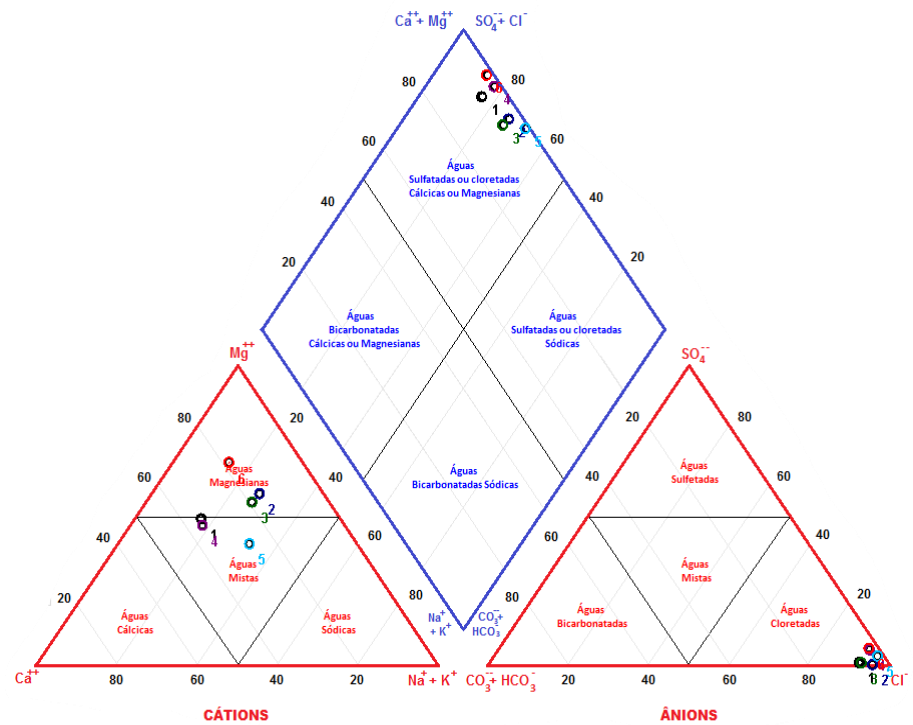
Os dados da Tabela 4 mostram que as águas dos poços das comunidades Extrema e Serrote Branco no município de Ibaretama apresentaram nos anos de 2020 a 2023 altas concentrações de magnésio e cloretos (média Mg⁺⁺: 1.701,74 mg/L e Cl⁻: 3.800,57 mg/L), águas com níveis elevados de sal (média Na⁺: 1.400,17 mg/L), condutividade elétrica elevada (média C.E: 8.990,17µS/cm) e pH (média) de 7,78. Assim, como observados nos municípios de Banabuiú e Choró, nenhum dos poços atendia ao balanço iônico BI de Logan (1965), reforçando a necessidade de tratamento adequado para as águas dos poços das comunidades em estudo na cidade de Ibaretama.

Quanto a potabilidade todas as amostras (Tabela 5) atendem a legislação vigente para os parâmetros de: Na⁺, Fe, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻, NO₃⁻ e turbidez, conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), considerados os Valores Máximos Permitidos (VMP) de cada espécie química/propriedade e a incerteza dos métodos utilizados.

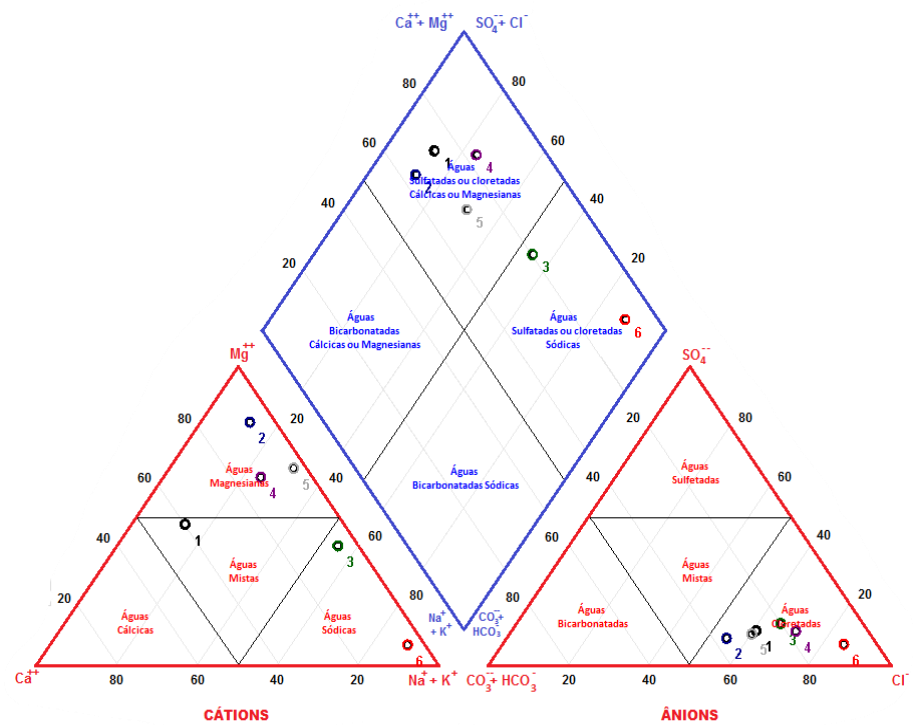
Os diagramas de Piper das águas brutas e após dessalinização nas localidades do município de Ibaretama estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizadas (b) nos poços do município de Ibaretama, Ceará

a)



b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Segundo o diagrama de Piper das águas após dessalinização (Figura 21b), 50% das águas são classificadas como “magnesiana cloretadas” e 50% são “cloretadas mistas”. Após tratamento o cátion predominante nas águas foi o Mg^{++} com frequência de 50% enquanto o ânion predominante foi o Cl^- (100% de prevalência). A média de STD das amostras de águas tratada foi 108,68 mg/L, o que as caracteriza como “água doce”, de acordo com a Resolução Nº 357 de 2005 do CONAMA.

5.1.4 Município de Ibicuitinga

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras de água bruta dos poços no Município de Ibicuitinga ao longo dos 3 anos de monitoramento.

Tabela 6 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Ibicuitinga, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
AB1	11.2020	1172,00	13,30	3044,87	2099,98	3651,42	2,00	212,41	83,11	7,31	0,05	0,16	11650,0	7,60	0,36	55,30	Mista Cloretada
AB2	02.2021	591,00	14,10	2289,23	4133,51	3847,11	10,00	140,69	64,32	12,91	0,05	0,10	11590,0	8,00	0,33	62,05	Magnesiana Cloretada
AB3	03.2022	1600,00	18,90	1931,01	2455,92	3613,41	2,00	233,62	63,55	7,53	0,05	0,10	12120,0	6,95	0,38	54,95	Magnesiana Cloretada
AR1	11.2020	334,00	21,30	808,15	908,15	1021,75	2,00	91,40	10,00	4,78	0,05	0,10	2980,00	7,70	0,74	61,93	Magnesiana Cloretada
AR2	02.2021	2000,00	29,50	620,12	1417,43	4347,99	10,0	170,27	17,51	17,43	0,05	0,10	5322,00	8,00	0,31	30,20	Mista Cloretada
AR3	03.2022	1360,00	37,40	548,56	1456,63	2023,80	2,00	146,46	10,81	23,40	0,05	0,10	5126,00	7,14	0,36	55,24	Magnesiana Cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: AB - Assentamento Barbadinha, AR - Assentamento Renascer.

Tabela 7 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas dos poços em estudo no município de Ibicuitinga, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
AB1	11.2020	9,80	1,00	41,02	19,79	30,11	2,00	20,73	10,00	1,00	0,05	0,10	359,00	7,00	0,35	47,66	Mista Cloretada
AB2	02.2021	51,50	1,00	15,50	63,01	89,44	10,00	24,41	10,00	1,13	0,05	0,10	260,80	5,30	0,37	40,71	Magnesiana Cloretada
AB3	03.2022	70,30	1,30	2,00	17,44	77,97	2,00	3,12	54,00	0,10	0,05	0,10	219,50	6,00	0,38	14,68	Sódica Cloretada
AR1	11.2020	10,90	1,00	40,00	61,83	29,91	2,00	23,35	10,00	0,10	0,05	0,10	98,92	7,20	0,10	66,95	Magnesiana Cloretada
AR2	02.2021	13,50	1,00	12,28	50,13	37,46	10,00	26,27	10,00	0,10	0,05	0,10	94,43	7,70	0,34	45,01	Magnesiana Cloretada
AR3	03.2022	21,20	1,00	2,00	20,85	23,80	2,00	14,56	10,00	0,10	0,05	0,10	81,32	8,30	0,51	39,97	Magnesiana Cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: AB - Assentamento Barbadinha, AR - Assentamento Renascer.

Os dados da Tabela 6 no Município de Ibicuitinga no monitoramento dos assentamentos Barbadinha e Renascer mostraram no período em estudo altas concentrações de magnésio e cloretos (média Mg^{++} : 2.078,6 mg/L e Cl^- : 3.084,25 mg/L), águas salobras com níveis moderados de sal (média Na^+ : 1.176,17 mg/L), condutividade elétrica elevada (média C.E: 8.131,33 $\mu S/cm$) e o pH (média) de 7,61.

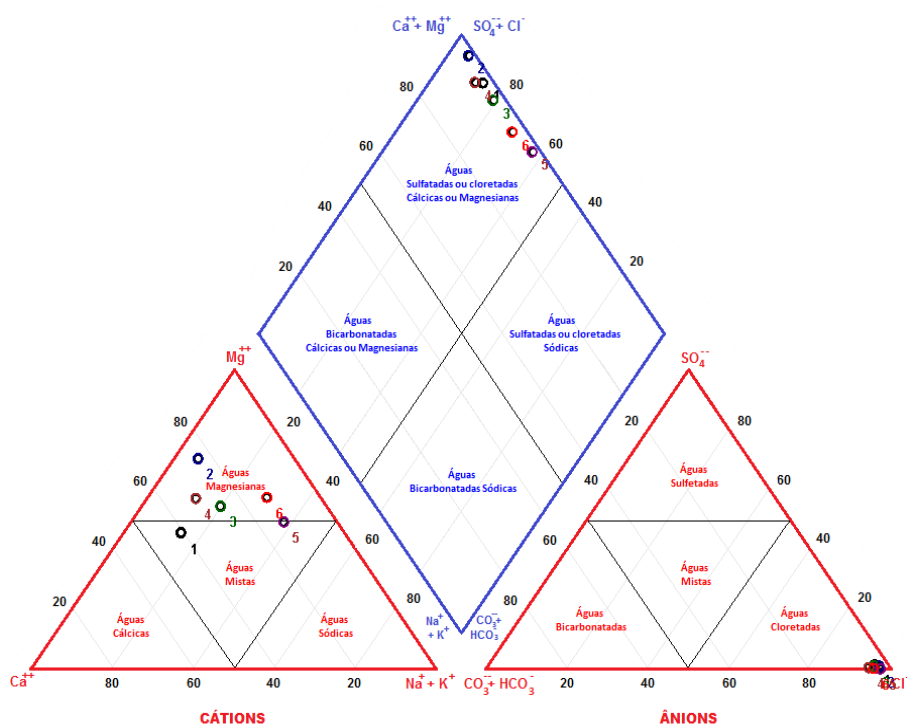
Ademais, nenhum dos poços atende ao balanço iônico de Logan (1965) para BI, justificando a necessidade de tratamento adequado para as águas dos poços das comunidades em estudo na cidade de Ibicuitinga.

Quanto a potabilidade todas as amostras (Tabela 7) atendem a legislação vigente para os parâmetros de: Na^+ , Fe, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- e turbidez, conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), considerados os Valores Máximos Permitidos de cada espécie química/propriedade e a incerteza dos métodos utilizados.

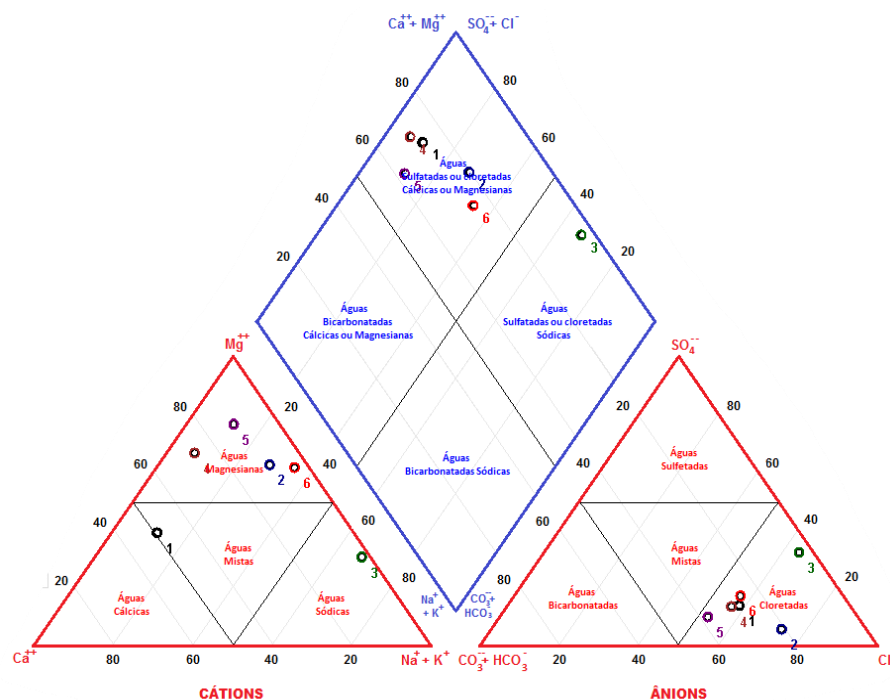
Os diagramas de Piper das águas brutas e após dessalinização nas localidades do município de Ibicuitinga estão apresentados na Figura 22.

Figura 22 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizadas (b) nos poços do município de Ibicuitinga, Ceará

a)



b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Segundo o diagrama de Piper das águas após dessalinização (Figura 22b), 67% das águas são classificadas como “magnesianas cloretadas” e 33% são “cloretadas mistas”. Após tratamento o cátion predominante nas águas foi o Mg^{++} com frequência de 67% enquanto o ânion predominante foi o Cl^- (100% de prevalência). A média de STD das amostras foi de 120,69 mg/L, o que as caracteriza como “águas doces” de acordo com a Resolução CONAMA Nº 357 de 2005.

5.1.5 Município de Milhã

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras de água bruta dos poços no Município de Milhã ao longo dos 3 anos de monitoramento.

Tabela 8 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Milhã, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
BR1	11.2020	420,00	22,00	608,15	1673,45	2111,76	2,00	278,25	10,00	10,99	0,05	0,10	5949,00	7,20	0,10	48,73	Magnesiana Cloretada
BR2	02.2021	2155,00	24,10	1276,49	2472,45	5869,58	10,00	287,79	10,30	4,16	0,05	0,10	6844,00	7,50	0,20	35,81	Magnesiana Cloretada
BR3	06.2022	310,00	17,80	405,94	382,58	919,71	2,00	250,26	11,23	9,01	0,05	0,10	3471,00	7,20	0,62	36,81	Mista Cloretada
MV1	11.2020	1210,00	5,40	1004,07	1393,86	1585,82	2,00	3563,7	78,73	15,99	0,05	0,10	5937,00	7,70	0,10	34,97	Magnesiana Carbonatada
MV2	02.2021	27,80	1,00	42,08	150,80	68,39	10,00	29,58	10,00	2,56	0,05	0,10	217,80	8,00	0,47	68,38	Magnesiana Cloretada
MV3	06.2022	457,00	8,70	574,27	607,70	1.444,3	2,00	366,01	37,26	6,38	0,05	0,10	5.108,00	7,40	0,42	34,98	Magnesiana Cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: BR - Barra, MV - Sítio Milhã Velha.

Tabela 9 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas dos poços em estudo no município de Milhã, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
BR1	11.2020	14,60	1,30	2,00	29,38	40,91	2,00	17,11	10,00	0,51	0,05	0,10	130,90	7,00	0,29	30,14	Magnesiana Cloretada
BR2	02.2021	28,10	1,40	7,65	143,55	48,61	10,00	11,58	10,00	0,99	0,05	0,10	140,40	8,50	0,10	72,95	Magnesiana Cloretada
BR3	03.2022	15,60	1,00	11,27	14,98	24,94	2,00	17,12	10,00	0,10	0,05	0,10	74,78	6,80	0,40	33,01	Mista Cloretada
MV1	11.2020	16,00	1,00	20,16	57,14	49,38	2,00	15,70	10,00	1,64	0,05	0,10	195,40	8,00	0,10	53,91	Magnesiana Cloretada
MV2	02.2021	21,60	1,00	24,16	156,84	50,29	10,00	19,44	10,00	1,22	0,05	0,10	134,40	7,50	0,37	73,73	Magnesiana Cloretada
MV3	03.2022	7,15	1,00	2,00	16,83	19,86	2,00	30,32	10,00	5,76	0,05	0,10	108,30	6,80	0,35	15,50	Magnesiana Mista

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: BR - Barra, MV - Sítio Milhã Velha.

Os dados da Tabela 8 mostram que nas comunidades Barra e Sítio Milhã Velha em Milhã apresentaram no período em estudo altas concentrações de magnésio e cloretos (média Mg⁺⁺: 1.113,47 mg/L e Cl⁻: 1.999,93 mg/L), águas salobras com níveis moderados de sal (média: Na⁺: 763,30 mg/L), condutividade elétrica elevada (média CE: 4.587,80 µS/cm) e pH (média) de 7,50. A comunidade Barra apresentou as maiores variações de Na, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ e Cl⁻ com valores bem acima da média. Notadamente, nenhum dos poços atende ao balanço iônico BI de Logan (1965), comprovando a necessidade de tratamento adequado para as águas dos poços das comunidades sob monitoramento na cidade de Milhã.

Quanto a potabilidade todas as amostras da Tabela 9 atendem a legislação vigente para os parâmetros de: Na⁺, Fe, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻, NO₃⁻ e turbidez, conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), considerados os Valores Máximos Permitidos de cada espécie química/propriedade e a incerteza dos métodos utilizados.

Os diagramas de Piper das águas brutas e após dessalinização nas localidades do município de Milhã estão apresentados na Figura 23.

Segundo o diagrama de Piper das águas após dessalinização (Figura 23b), 67% das águas são classificadas como “magnesiana cloretada”, 16,5% são “magnesianas mistas” e 16,5% são “mistas cloretadas”. Após tratamento o cátion predominante nas águas foi o Mg⁺⁺ com frequência de 83% enquanto o ânion predominante foi o Cl⁻ (83% de prevalência). A média de STD das amostras de água tratada foi 84,95 mg/L, o que as caracteriza como “água doce”, de acordo com a Resolução Nº 357 de 2005 do CONAMA.

5.1.6 Município de Mombaça

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras das águas brutas dos poços no Município de Mombaça ao longo dos 3 anos de monitoramento.

Tabela 10 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Mombaça, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
NU1	11.2020	283,00	6,60	257,14	671,42	636,33	2,00	399,45	66,95	17,61	0,05	0,10	1837,00	7,90	0,31	51,26	Magnesiana Cloretada
NU2	02.2021	273,00	6,60	342,27	1272,46	770,26	10,00	424,14	55,05	9,68	0,05	0,10	2058,00	8,20	0,33	63,21	Magnesiana Cloretada
NU3	06.2022	196,00	6,30	205,79	265,79	247,65	2,00	356,52	47,94	17,17	0,05	0,10	1533,00	7,20	0,66	49,22	Magnesiana Cloretada
SL1	11.2020	103,00	7,50	308,16	608,15	349,28	2,00	283,68	42,82	17,19	0,05	0,10	1615,00	7,90	0,45	63,86	Magnesiana Cloretada
SL2	02.2021	131,00	7,70	384,55	1328,84	328,30	10,00	294,00	42,27	13,50	0,05	0,10	1748,00	7,90	0,39	79,57	Magnesiana Cloretada
SL3	06.2022	110,00	7,20	202,97	234,78	214,39	40,02	160,93	33,66	15,34	0,05	0,10	1418,00	7,40	1,18	52,51	Magnesiana Cloretada
VC1	11.2020	160,00	1,00	228,57	314,28	291,07	2,00	409,12	17,08	3,36	0,05	0,10	1253,00	8,10	0,36	48,52	Magnesiana Cloretada
VC2	02.2021	189,00	1,10	432,88	688,58	408,28	10,00	417,73	18,86	4,20	0,05	0,10	1270,00	8,00	0,54	63,85	Magnesiana Cloretada
VC3	06.2022	162,00	1,00	226,32	70,47	183,76	2,00	394,89	20,39	5,49	0,05	0,10	1115,00	7,40	0,70	33,13	Mista Bicarbonatada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: NU - Nova União, SL - Sítio Lajes e VC - Várzea Comprida.

Tabela 11 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Mombaça, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
NU1	11.2020	3,40	1,00	2,00	46,32	9,23	2,00	10,87	10,00	1,00	0,05	0,10	23,70	8,40	0,24	70,25	Magnesiana Mista
NU2	02.2021	5,20	1,00	2,00	49,32	9,89	10,0	10,00	10,00	0,42	0,05	0,10	34,00	8,70	0,47	63,49	Magnesiana Bicarbonatada
NU3	06.2022	5,00	1,00	2,00	13,73	13,60	2,00	11,14	10,00	0,10	0,05	0,10	22,69	6,80	0,45	27,28	Magnesiana Mista
SL1	11.2020	5,10	1,00	2,00	29,59	6,02	2,00	15,30	10,00	3,47	0,05	0,13	55,78	8,70	0,10	59,99	Magnesiana Mista
SL2	02.2021	5,50	1,00	2,00	52,34	13,04	10,0	12,00	10,00	2,58	0,05	0,10	36,60	8,70	0,67	61,70	Magnesiana Mista
SL3	06.2022	5,90	1,00	15,10	4,79	11,55	2,00	26,61	10,00	4,67	0,05	0,10	35,65	6,80	0,55	15,97	Cálcica Mista
VC1	11.2020	3,50	1,00	2,00	22,44	6,02	2,00	19,53	10,00	1,00	0,05	0,10	45,16	8,50	0,10	47,04	Magnesiana Bicarbonatada
VC2	02.2021	2,60	1,00	2,00	65,63	14,73	10,0	17,79	10,00	0,10	0,05	0,10	24,17	8,80	0,29	63,73	Magnesiana Bicarbonatada
VC3	06.2022	4,20	1,00	2,00	9,30	9,75	2,00	25,37	10,00	4,60	0,05	0,10	27,30	6,80	0,62	5,27	Magnesiana Mista

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: NU - Nova União, SL - Sítio Lajes e VC - Várzea Comprida.

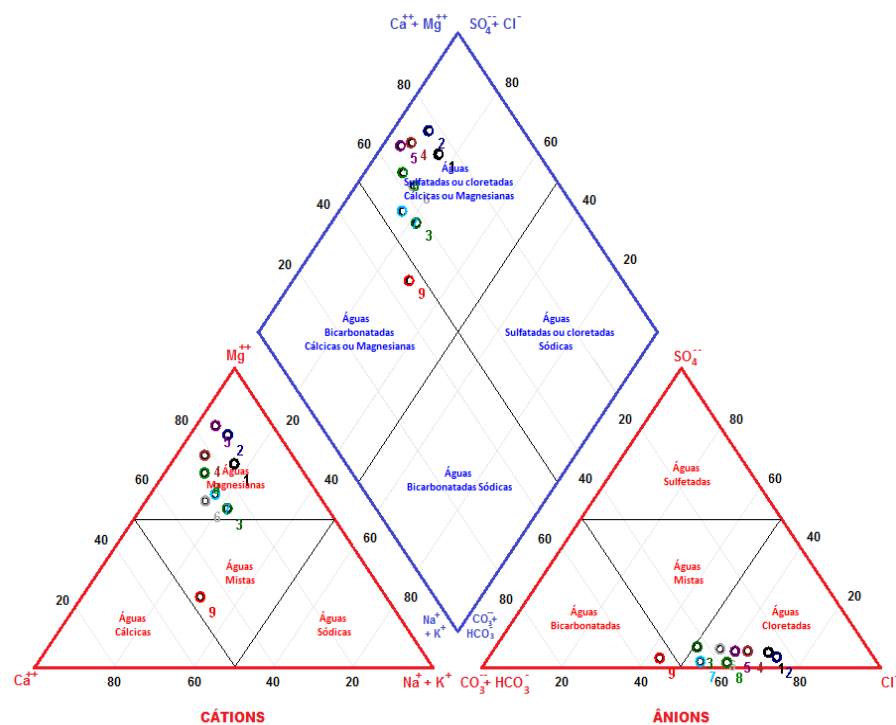
Os dados da Tabela 10 mostram que nas comunidades de Nova União, Sítio Lajes e Várzea Comprida em Mombaça foram encontradas durante o período do estudo concentrações moderadas de magnésio e cloretos (média Mg⁺⁺: 606,09 mg/L e Cl⁻: 381,04 mg/L), águas salobras com níveis moderados de sal (média: Na⁺178,56 mg/L), condutividade elétrica moderada (média CE: 1.538,56 µS/cm) e pH (média) de 7,78. Notadamente, nenhum dos poços atende ao balanço iônico de Logan (1965), ratificando a necessidade de tratamento adequado para as águas dos poços das comunidades em estudo na cidade de Mombaça.

Quanto a potabilidade todas as amostras da Tabela 12 atendem a legislação vigente para os parâmetros de: Na^+ , Fe , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- e turbidez, conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), considerados os Valores Máximos Permitidos de cada espécie química/propriedade e a incerteza dos métodos utilizados.

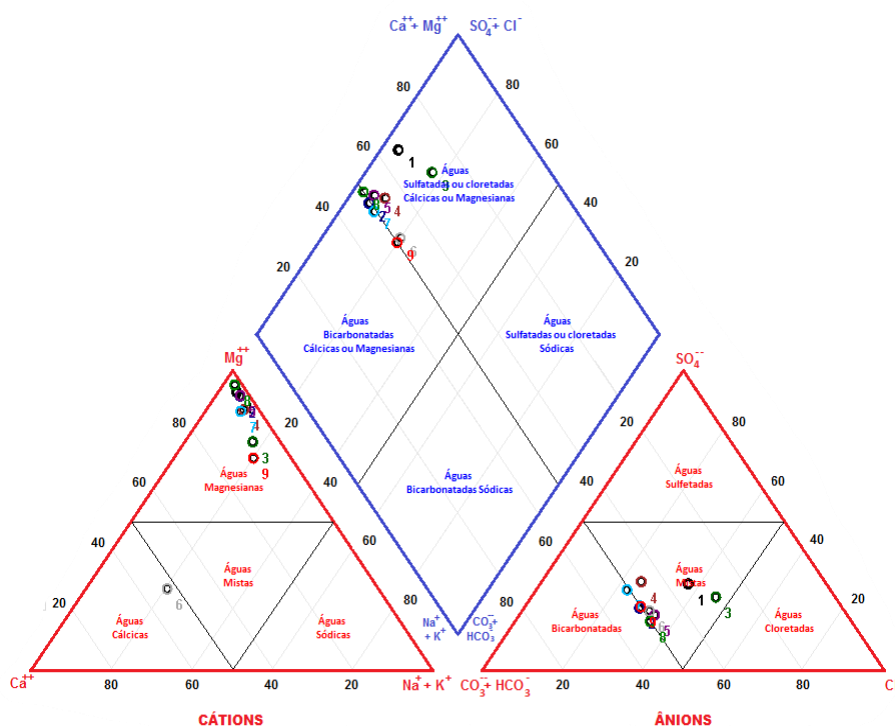
Os diagramas de Piper das águas brutas e após dessalinização nas localidades do município de Mombaça estão apresentados na Figura 24.

Figura 24 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizadas (b) nos poços do município de Mombaça, Ceará

a)



b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Segundo o diagrama de Piper das águas após dessalinização (Figura 24b), 56% das águas são classificadas como “magnesiana mista”, 33% são “magnesianas bicarbonatadas” e 11% é do tipo “cálcica mista”. Após tratamento o cátion predominante nas águas foi o Mg^{++} com frequência de 100% enquanto o ânion predominante foi o Cl^- (67% de prevalência). A média de STD das amostras de água tratada foi 22,0 mg/L, o que as caracteriza como “água doce”, de acordo com a Resolução N° 357 de 2005 do CONAMA.

5.1.7 Município de Piquet Carneiro

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras das águas brutas dos poços no Município de Piquet Carneiro ao longo dos 3 anos de monitoramento.

Tabela 12 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas nos poços em estudo no município de Piquet Carneiro, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
PT1	11.2020	121,00	7,20	242,85	432,65	254,93	2,00	350,13	12,37	21,98	0,05	0,10	1173,00	7,60	0,10	60,09	Magnesiânica Cloretada
PT2	02.2021	154,00	7,80	261,74	714,75	531,35	10,00	369,11	16,75	11,49	0,05	0,10	1336,00	7,80	0,47	56,77	Magnesiânica Cloretada
PT3	06.2022	159,00	8,50	196,12	103,09	227,08	2,00	334,65	19,62	15,32	0,05	0,10	1329,00	7,40	1,09	34,54	Mista Cloretada
SM1	11.2020	189,00	3,30	148,97	461,22	323,18	2,00	404,08	22,50	3,98	0,05	0,10	1202,00	8,20	0,96	53,47	Magnesiânica Cloretada
SM2	02.2021	226,00	2,60	181,20	710,73	313,30	10,00	400,55	31,02	1,12	0,05	0,10	1218,00	8,70	0,27	65,07	Magnesiânica Cloretada
SM3	06.2022	224,00	4,00	243,71	49,93	243,71	2,00	388,08	23,07	8,77	0,05	0,16	1274,00	7,60	1,07	30,95	Mista Cloretada
SR1	11.2020	161,00	13,40	357,14	575,50	632,32	2,00	396,23	21,33	1,83	0,05	0,10	1928,00	7,40	0,10	48,97	Magnesiânica Cloretada
SR2	02.2021	550,00	10,50	261,74	938,24	1422,58	10,00	434,42	25,47	1,82	0,05	0,10	1994,00	7,50	0,16	40,80	Magnesiânica Cloretada
SR3	06.2022	115,00	5,30	105,51	161,08	200,83	2,00	313,40	12,69	1,00	0,05	0,10	863,90	7,60	0,68	36,00	Magnesiânica Cloretada
TT1	11.2020	109,00	11,10	496,91	324,48	511,88	2,00	426,63	15,95	4,19	0,05	0,10	1763,00	7,60	0,24	44,30	Mista Cloretada
TT2	02.2021	3350,00	29,90	1260,38	1350,99	6990,14	10,00	88,55	133,96	21,45	0,05	0,10	11100,0	7,30	0,93	22,75	Mista Cloretada
TT3	06.2022	149,00	149,00	286,33	257,74	429,23	2,00	461,53	21,49	1,00	0,05	0,10	1880,00	7,20	1,85	38,82	Mista Cloretada

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: PT - Pitombas, SM - Serrote dos Martins, SR - Sítio Recanto e TT – Tataíra.

Tabela 13 — Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas dessalinizadas nos poços em estudo no município de Piquet Carneiro, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Local	Mês.ano	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	CE	pH	TU	BI (%)	Classificação iônica
PT1	11.2020	2,80	1,00	2,00	17,75	10,84	2,00	15,90	10,00	0,10	0,05	0,10	27,85	7,10	0,10	33,98	Magnesiânica Mista
PT2	02.2021	3,20	1,00	2,00	24,76	7,40	10,00	14,27	10,00	0,10	0,05	0,10	16,04	8,20	0,51	40,09	Magnesiânica Bicarbonatada
PT3	06.2022	3,40	1,00	2,00	6,84	4,33	2,00	14,85	10,00	0,10	0,05	0,10	17,43	6,80	0,66	13,25	Magnesiânica Mista
SM1	11.2020	3,00	1,00	2,00	31,42	3,61	2,00	17,11	10,00	1,00	0,05	0,10	23,00	8,50	0,98	62,42	Magnesiânica Bicarbonatada
SM2	02.2021	3,10	1,00	2,00	26,17	5,08	10,00	17,58	10,00	0,10	0,05	0,10	12,80	9,30	0,32	42,52	Magnesiânica Bicarbonatada
SM3	06.2022	3,60	1,00	2,00	7,37	5,38	2,00	20,21	10,00	0,10	0,05	0,10	15,44	6,80	0,44	7,92	Magnesiânica Bicarbonatada
SR1	11.2020	3,30	1,00	2,00	23,46	6,82	2,00	18,72	10,00	0,10	0,05	0,20	48,27	7,10	0,10	47,92	Magnesiânica Mista
SR2	02.2021	4,10	1,00	2,00	33,22	7,19	10,00	10,00	10,00	0,10	0,05	0,10	26,00	8,00	0,26	53,95	Magnesiânica Bicarbonatada
SR3	06.2022	3,40	1,00	4,55	4,87	4,90	2,00	11,76	10,00	0,10	0,05	0,10	18,95	6,80	0,58	13,90	Mista Mista
TT1	11.2020	2,80	1,00	2,00	40,20	13,85	2,00	20,73	10,00	0,10	0,05	0,10	51,12	8,00	0,10	55,89	Magnesiânica Mista
TT2	02.2021	4,10	1,00	2,00	30,00	9,73	10,00	11,79	10,00	0,10	0,05	0,10	19,07	7,80	0,16	46,61	Magnesiânica Bicarbonatada
TT3	06.2022	3,90	3,90	6,76	4,39	9,01	2,00	15,06	10,00	0,10	0,05	0,10	21,99	6,80	0,47	11,04	Mista Mista

.Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota: PT - Pitombas, SM - Serrote dos Martins, SR - Sítio Recanto e TT – Tataíra.

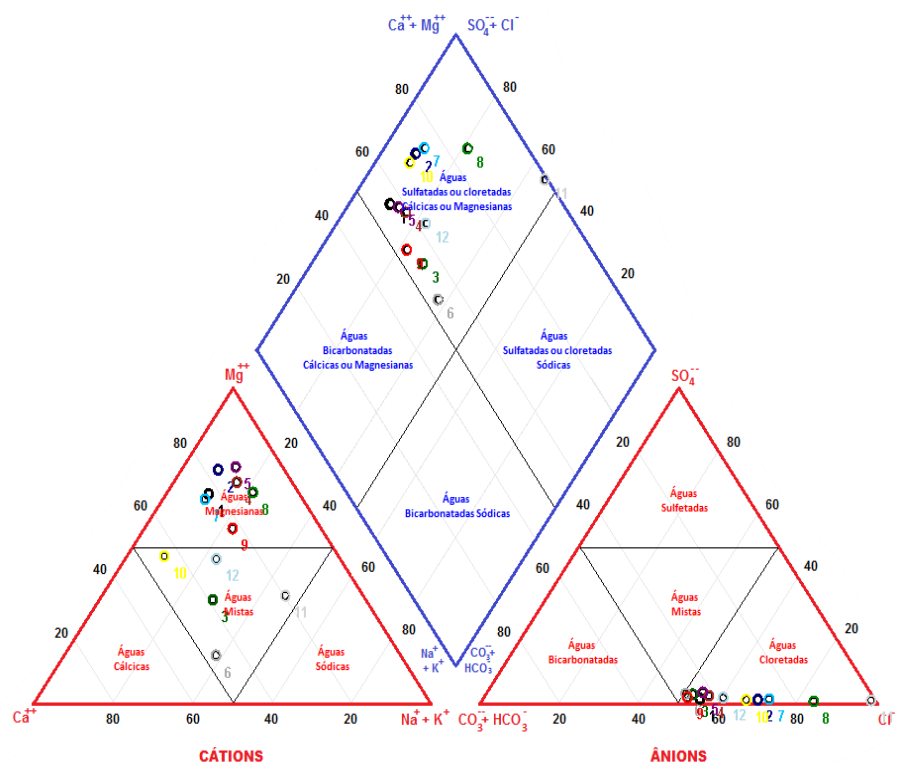
Os dados da Tabela 12 mostram que o monitoramento nas comunidades de Pitombas, Serrote dos Martins, Sítio Recanto e Tataíra apresentou no período em estudo moderadas concentrações de magnésio e cloretos (média Mg⁺⁺: 506,70 mg/L e Cl⁻: 1.006,71 mg/L), águas salobras (média Na⁺: 458,92 mg/L), condutividade elétrica elevada (média CE: 2.255,08 µS/cm) e pH (média) de 7,66. A comunidade Tataíra apresentou as maiores variações de Na, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ e Cl⁻ com valores bem acima da média.

Quanto a potabilidade todas as amostras da Tabela 13 atendem a legislação vigente para os parâmetros de: Na⁺, Fe, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻, NO₃⁻ e turbidez, conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), considerados os Valores Máximos Permitidos de cada espécie química/propriedade e a incerteza dos métodos utilizados.

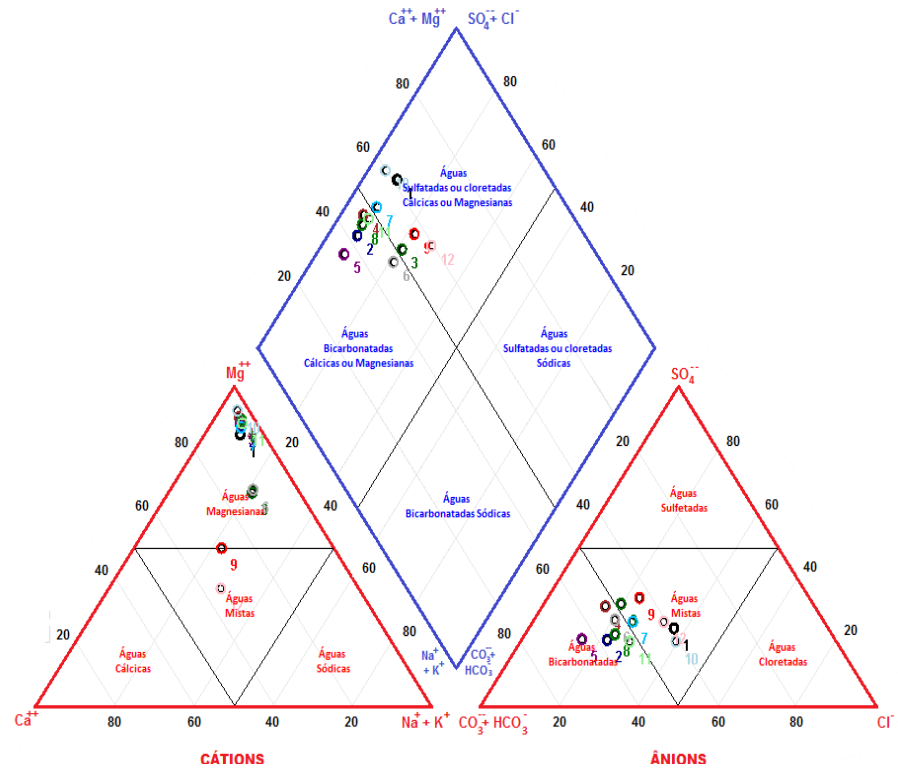
Notadamente, nenhum dos poços atende ao balanço iônico de Logan (1965), indicando a necessidade de tratamento adequado para as águas dos poços das comunidades em estudo na cidade de Piquet Carneiro. Os diagramas de Piper das águas brutas e após dessalinização nas localidades do município de Piquet Carneiro estão apresentados na Figura 25.

Figura 25 — Diagrama de Piper das águas brutas (a) e dessalinizadas (b) nos poços do município de Piquet Carneiro, Ceará

a)



b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Segundo o diagrama de Piper das águas após dessalinização (Figura 25b), 50% das águas são classificadas como “magnesianas bicarbonatadas”, 33% são “magnesianas mistas” e 17% são apenas mistas. Após tratamento o cátion predominante nas águas foi o Mg^{++} com frequência de 83% enquanto o ânion predominante foi bicarbonato (50% de prevalência). A média de STD das amostras de água tratada foi 16,13 mg/L, o que as caracteriza como “água doce”, de acordo com a Resolução N° 357 de 2005 do CONAMA.

6 CONCLUSÕES

As águas analisadas apresentam alta mineralização devido a formação geológica típica do semiárido nordestino e alta residência nos meios em que percolam, o que pode ser constatado pelos valores elevados de condutividade elétrica.

A análise de íons nas águas subterrâneas dos poços nos setes municípios e suas 22 localidades em estudo no sertão central cearense ratificam três tipos hidroquímicos dominantes: águas magnesianas cloretadas, águas mistas cloretadas e água sódica cloretada.

Particularmente, em todas as amostras brutas foram observadas elevadas concentrações de sódio e magnésio, caracterizando-as como impróprias para o consumo humano. O Mg^{++} foi o cátion predominante nas águas de todos os poços em estudo, enquanto o cloreto foi o ânion prevalente.

As águas permeadas ou tratadas para remoção de sais, por sua vez, apresentaram em sua maioria, baixa mineralização resultante do processo de dessalinização por osmose reversa. A classificação das mesmas como “água doce” foi confirmada a partir da Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde e do Conselho Nacional do Meio Ambiente a partir da Resolução CONAMA 357/2005 e CONAMA 396/2008 do Ministério do Meio Ambiente.

Em geral, o sistema de osmose reversa desenvolvido apresentou elevada eficiência de operação durante o período do estudo nas localidades monitoradas. Em termos, o impacto social as famílias atendidas com água de boa qualidade são consideráveis (e inegável) nos seus aspectos de saúde e desenvolvimento humano.

REFERÊNCIAS

- ALVES, G. A. **Uso de eletrodialise para geração de energia elétrica e/ou dessalinização**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2017.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24 ed. APHA, 2023.
- ARAÚJO, G. C.; ROSA, T. D. S.; OLIVEIRA, T. Dessalinização de água salobra por osmose reversa: uma revisão de literatura. **Journal of Exact Sciences**, v. 31, n. 1, p. 18-24, 2021.
- AYERS, R. S. Westcot, D. W. **A qualidade de água na agricultura**. 2 ed. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, p. 1-53, 1999.
- AZEVÊDO, A. C. **Avaliação de políticas públicas para o desenvolvimento regional/local: o caso do programa água doce no semiárido paraibano**. 2012. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional). UEPB: Rio Grande do Norte, 2012.
- BASTOS, D. C. O. **Manejo da salinidade em irrigação localizada: análise da alternativa de lixiviação incompleta**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). UFRPE: Recife, 2004.
- BECKER, H. **Apostila de Controle Analítico de Água**, 4º Versão, Fortaleza, 2008.
- BRAGA, E. A. S. et al. Classificação da água subterrânea com base nos sólidos totais dissolvidos estimado. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 2, p. 1-7, 2021.
- BRASIL, **Resolução CONAMA 357**, de 17 de março de 2005. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional, 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria GM/MS Nº 888**, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: Brasília, 07 mai. 2021, seção 1, 85 ed, p. 127.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Documento Base do Programa Água Doce**. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/agua-doce>>. Acesso em: 15 nov. 2022
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Orientações Técnicas dos Componentes do Programa Água Doce para Implantação dos Sistemas de Dessalinização**. Brasília, 2015. Disponível em:<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/aguadoce/ArquivosPDF/aguadoce_orientacoes_tecnicas_22jun15rev.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2023
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 396**, de 3 de abril de 2008. Diário Oficial da União: Brasília, 7 de abril de 2008. Seção 1, p. 64-68. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

CABRAL, N. M. T. Teores de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) nas águas do aquífero Barreiras nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal-Belém/PA. **Química Nova**, v. 30, p. 1804-1808, 2007.

CANTELLE, T. D.; DE CASTRO, E. L.; BORGES, L. A. C. Panorama dos recursos hídricos no mundo e no Brasil. **Revista em agronegócio e meio ambiente**, v. 11, n. 4, p. 1259-1282, 2018.

CARACAS, I. B. **Influência da salinização em parâmetros de qualidade das águas subterrâneas na região costeira do Baixo Jaguaribe**. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

CASTRO, C. N. **Água, Problemas Complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica**. IPEA: Rio de Janeiro, 2022. p. 281

CAVALCANTE, F. P. **Relatório técnico contendo proposta de documento com um manual completo de dessalinização por osmose inversa**, [s.l.], 2018. Disponível em: https://aguadoce.mma.gov.br/anexos/Produto%204_Fabio%20Cavalcante.pdf. Acesso em: 02. mar. 2024.

CELLI, R. Modelos de dessalinização e sua eficiência: comparativo entre tecnologias. **Revista Gestão, Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 1, p. 31-38, 2017.

COINF/SRH. Mapa de localização dos dessalinizadores no Sertão Central, Ceará, Brasil. 2024.

CONNOR, R. **The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world**. UNESCO, 2015.

CUSTODIO, E. LLAMAS, M. R. **Hidrología Subterránea**. 2 ed. Barcelona: OMEGA, 1983.

DE BRITTO, C. A. M.; DE MELO, J. G.; DA SILVA, F. M. Aspectos da salinização das águas do aquífero cristalino no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 1, p. 67-82, 2006.

FEITOSA, F. A. C. et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 812

FONTENELE, A. P. G.; PEDROTTI, J. J.; FORNARO, A. Avaliação de metais traços e íons majoritários em águas de chuva na cidade de São Paulo. **Química Nova**, v. 32, 2009, p. 839-844.

FUNCEME. **Qualigraf: ferramenta para análise gráfica da qualidade de amostras d'água**, 2014. Disponível em: <https://qualigraf.funceme.br>. Acesso em: 5 abr. 2023.

GAIO, S. S. M. **Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade económica**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Universidade de Lisboa – Faculdade de Ciências, Lisboa, 2016.

GED. **Projeto Executivo dos Sistemas de Dessalinização do Programa Água Doce no Sertão Central**. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Disponível em: www.ged.srh.ce.gov.br/pesquisar_por_projeto.php. Acesso em: 10 fev. 2023.

GED. **Termo de Referência para manutenção preventiva e corretiva dos sistemas de dessalinização do Programa Água Doce**. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Disponível em: www.ged.srh.ce.gov.br/pesquisar_por_projeto.php. Acesso em: 10 fev. 2023.

GOMES, D. D. M.; MEDEIROS, C. N; ALBUQUERQUE, E. L. S. **Análise têmporo-espacial das ocorrências de focos de calor no estado do Ceará**: configuração dos cenários no contexto das unidades fitogeográficas e das Macrorregiões de Planejamento. Texto para Discussão, Fortaleza: IPECE, n. 90, 2010. p. 01-28.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas**. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2006. p.180.

HEM, J; D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. **US Geological Survey**, 3 ed. Reston, 1985.

HU, G. P.; BALASUBRAMANIAN, R. Wet deposition of trace metals in Singapore. **Water, air, and soil pollution**, v. 144, p. 285-300, 2003.

IBGE. **Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil**: uma primeira aproximação. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro: IBGE, p. 84, 2022.

IPECE. **As regiões de planejamento do estado do Ceará**. Fortaleza: Secretaria do Planejamento e Gestão, 2015. p. 33

IPECE. **Índice Municipal de Alerta – IMA**, 2020. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/indice-municipal-de-alerta/>. Acesso em: 2 fev. 2023.

IPECE. **Índice Municipal de Alerta – IMA**, 2021. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/indice-municipal-de-alerta/>. Acesso em: 2 fev. 2023.

IPECE. **Índice Municipal de Alerta – IMA**, 2022. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/indice-municipal-de-alerta/>. Acesso em: 2 fev. 2023.

IPECE. **Os Recursos Hídricos do Ceará**: Integração, Gestão e Potencialidades. Fortaleza: Secretaria do Planejamento e Gestão, 2011. 268 p.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. **As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2012.

JÚNIOR, R. G. C. **Exploração de águas subterrâneas na redução associada a fontes renováveis de energia na vulnerabilidade hídrica no nordeste brasileiro**: o caso do programa água doce no rio grande do norte. 2021. Tese (Doutorado em Planejamento Energético), Rio de Janeiro: UFRJ, 2021. p.161.

LIRA, R. H. P. **Avaliação dos efeitos fluidodinâmicos em módulos de membranas plana, curva e espiral via CFD**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Campina Grande: UFCG, 2020.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas da água**. Recife: [s.n], 1965. 66 p.

LUCON, T. N.; COSTA, A. T.; MEYER, B. O. Utilização do mapeamento hidroquímico para avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia do Rio São Miguel. **Geonomos**, v. 26, 2018.

MARINHO, F. J. L. Destilador solar destinado a fornecer água potável para as famílias de agricultores de base familiar. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 3, 2012. p. 53-60.

MONTEIRO, G.; SILVA, J. N.; LÔBO, H. Simulação e análise de sistema de dessalinização via osmose inversa: Considerações para análise da qualidade da água. **Enciclopédia Biosfera**, v. 5, n. 08, 2009.

MOURA, J. P. et al. Estudo de caso do pré-tratamento físico-químico utilizando membrana de microfiltração e ácido clorídrico em sistemas de dessalinização via osmose reversa. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23690>. Acesso em: 17 ago. 2023.

OLIVEIRA, F. V. C. DE; FEITOSA, F. A. C. **Diagnóstico do Município de Ibicuitinga**. Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 1998. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16139/1/Rel_Ibicuitinga.pdf. Acesso em: 04 mar. 2024.

PEREIRA, L. A salinidade das águas superficiais e subterrâneas na bacia da Gameleira, Município de Aiuaba/CE. **Águas subterrâneas**, v. 20, n. 2, p. 9-18, 2006.

PINHEIRO, L. G. Avaliação da sustentabilidade do processo de dessalinização de água no semiárido potiguar: estudo da comunidade Caatinga Grande. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 1, 2018. p. 132-157.

PORTO, E. R. et al. **Agricultura bioessalina: desafios e alternativas para o uso de águas salobras e salinas no semiárido brasileiro**. Jaguaruana: EMBRAPA, 2019.

RODRIGUES NETO, F. **Modelagem e controle de um sistema de dessalinização por osmose inversa utilizando redes de Petri**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica. Campina Grande: UFCG, 2005. p. 122.

SABINO, C. V. S. et al. Concepções de futuros professores sobre águas subterrâneas. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 11, n. 2, 2009. p. 318-334.

SAIA, A. **O acordo de gestão do programa água doce: importância da gestão compartilhada dos bens comuns para o desenvolvimento local**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Planejamento e Estratégias de Desenvolvimento). Brasília: ENAP, 2018. p. 33.

SILVA, J. C. **Análise de mecanismos de bloqueio de poro na microfiltração da água de produção**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.

SRH. **Programa Água Doce – PAD**. Fortaleza: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará, 2024. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/programa-agua-doce-pad/>. Acesso em: 03 mar. 2024.

SRH. **Programa Água Doce - PAD**. Fortaleza: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará, 2023. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/category/programa-agua-doce/>. Acesso em: 03 mar. 2024.

SUDENE. **Delimitação do semiárido**. Ministério do Desenvolvimento Regional/SUDENE, 2017. Disponível em: <http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: 02 abr. 2023.

TAVARES, R. et al. Abastecimento hídrico no arquipélago Fernando de Noronha-PE. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais**. Recife, 2009.

TORRI, J. B. **Dessalinização de água salobra e/ou salgada**: métodos, custos e aplicações. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Porto Alegre: UFRGS, 2015. p.55.

VIEIRA ALVES, R. Monitoramento do desempenho do sistema de dessalinização da comunidade de Uruçu – PB. **Águas Subterrâneas**, v. 27, n. 2, 2013. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27957>. Acesso em: 16 ago. 2023.

VILLANUEVA, T. C. B. et al. Caracterização hidroquímica e hidrogeológica do aquífero Cárstico Salitre na região de Irecê, Bahia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n. 4, p. 83-96, 2014.

YOUNOS, T.; TULOU, K. E. Overview of desalination techniques. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 132, n. 1. p. 3-10, 2005.