

TRATAMENTO DE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS

Francisca Darah Falcão Lima¹
George Leite Mamede²

RESUMO

A seca periódica é um fenômeno natural em áreas semiáridas devido às condições ambientais. A população aprende a conviver com os desafios impostos pela escassez hídrica. O uso de tecnologias socioambientais em locais vulneráveis fortalece a resiliência das famílias que enfrentam condições adversas. A gestão e o tratamento da água são essenciais para a subsistência das comunidades, especialmente aquelas que dependem da agricultura familiar. Nesse contexto, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de tratamento de água, a partir de artigos, e-books e guias técnicos publicados entre 2014 e 2024. Foram identificadas as tecnologias sociais, como barragem subterrânea, cisterna de placa, sistemas de captação de água por enxurrada e calçadão, osmose reversa, destilador solar, aquaponia, bioágua familiar e *wetlands* construídos. Esses sistemas possibilitam o uso sustentável dos recursos naturais, garantindo água de qualidade para os usos domésticos e agropecuários, e melhorando a qualidade de vida em localidades com condições limitantes. Contribuindo também para o desenvolvimento regional, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2, 3 e 6 da Agenda 2030 no Brasil.

Palavras-chave: Tratamento de água. Alternativas sustentáveis. Semiárido.

ABSTRACT

Periodic drought is a natural phenomenon in semi-arid areas due to environmental conditions. The population learns to live with the challenges posed by water scarcity. The use of socio-environmental technologies in vulnerable locations strengthens the resilience of families facing adverse conditions. Water management and treatment are essential for the subsistence of communities, especially those that depend on family farming. In this context, a bibliographical review was carried out on water treatment systems, based on articles, e-books and technical guides published between 2014 and 2024. Social technologies were identified, such as underground dams, plate cisterns, collection systems of water by flood and boardwalk, reverse osmosis, solar distiller, aquaponics, family biowater and constructed *wetlands*. These systems enable the sustainable use of natural resources, guaranteeing quality water for domestic and agricultural uses, and improving the quality of life in locations with limiting conditions. Also contributing to regional development, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs) 2, 3 and 6 of the 2030 Agenda in Brazil.

Keywords: Water treatment. Sustainable alternatives. Semi-arid.

¹ Discente da Especialização em Gestão de Recursos Hídricos Ambientais e Energéticos, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB).

² Docente do Programa de Pós-graduação, PGEA da UNILAB, mamede@unilab.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro é caracterizado, conforme a portaria nº 89 de 16 de março de 2005, do Ministério da Integração Nacional, com precipitação pluviométrica média anual de 800 mm, índice de aridez de até 0,5 e risco de seca maior que 60%. Essas condições favorecem o desenvolvimento de uma vegetação adaptável à aridez, como a Caatinga, caracterizada por espécies xerófilas. Ademais, as características edafoclimáticas restritas para a manutenção de espécies frutíferas proporcionam a produção, mesmo em um ambiente adverso como o sertão nordestino, que possui uma pluviosidade naturalmente irregular (Kiill *et al.*, 2019).

A escassez hídrica é uma característica comum nas regiões semiáridas, e a salinização dos solos reflete as condições climáticas dessas áreas. Além disso, o ambiente semiárido também influencia o material geológico, pois a intemperização química das rochas ocorre mais lentamente devido à falta de umidade e às condições climáticas específicas (Araújo Filho *et al.*, 2022).

A gestão e o tratamento da água são essenciais para a subsistência das famílias que convivem com as condições semiáridas. A distribuição de água potável e o acesso ao saneamento básico são desiguais, agravado ainda mais pela falta de infraestrutura adequada em muitas localidades.

A população aprende a conviver com os desafios ligados à seca periódica, um fenômeno natural em locais com características semiáridas. O uso de tecnologias sustentáveis possibilita um bem-estar social, e um melhor aproveitamento das condições locais. A agricultura familiar e agropecuária é predominante em regiões limitadas pelas características morfológicas do solo, influenciando na capacidade de armazenamento hídrico, e assim, limitando o uso para certas atividades cotidianas, requerendo adoção de práticas mais condizentes com a realidade local (Melo e Voltolini, 2019).

A República Federal do Brasil, através do decreto nº 11.704/2023, institui a Comissão Nacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (CNODS). Ela é responsável por coordenar as ações estratégicas de implementação e monitoramento dos programas, abrangendo todas as esferas governamentais e a sociedade civil, visando atender os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 no País. No contexto do semiárido brasileiro, em particular, a implementação de projetos sustentáveis para o tratamento da água, auxiliando na erradicação da fome e agricultura sustentável (ODS 2), saúde e bem-estar (ODS 3) e o acesso a água limpa e saneamento (ODS 6). Para isso, é

necessário um planejamento estratégico, investimentos em pesquisas e a colaboração de vários agentes sociais, como o governo e as instituições de ensino superior. Surgindo, então, a seguinte pergunta: Qual a contribuição das tecnologias socioambientais na resolução dos problemas em regiões semiáridas?

Diante da escassez hídrica e da falta de infraestrutura em áreas rurais, sistemas como captação de água pluvial, dessalinização e reaproveitamento de água, emergem como soluções práticas e adaptáveis às peculiaridades de cada comunidade, contribuindo significativamente para a melhoria da qualidade de vida. Essas tecnologias, por meio de uma gestão sustentável dos recursos naturais, especialmente da água, reduzem consideravelmente os impactos ambientais ocasionados pela exploração excessiva. Como resultado, promovem o desenvolvimento socioeconômico e ambiental dessas regiões.

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias sustentáveis aplicadas ao tratamento de água no semiárido. Incluindo os seguintes objetivos específicos: (I) Verificar as tecnologias sustentáveis mais empregadas no tratamento de água em regiões semiáridas; (II) descrever os princípios de funcionamento e suas características.

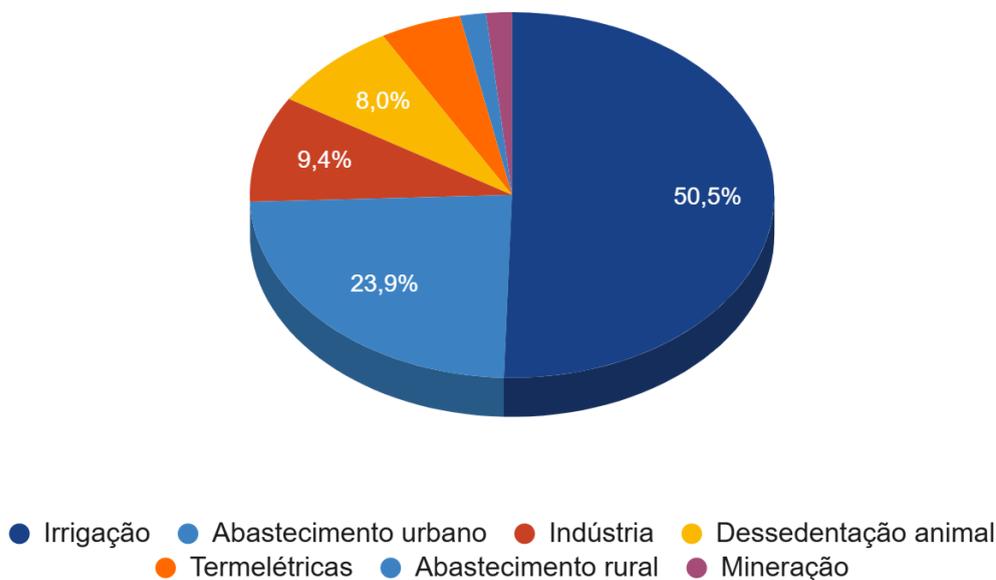
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A água, essencial para toda a vida, é um bem comum utilizado em diversos setores, como abastecimento e agricultura. Segundo Silva Netto (2022, p. 3):

A exploração desenfreada dos corpos d'água, o desmatamento, a contaminação por agrotóxicos, esgotos, resíduos sólidos e a exploração indiscriminada dos recursos hídricos têm levado ao ressecamento de rios, lagos, açudes e aquíferos em todo o mundo. Grande parcela da água extraída para o uso humano, independentemente da fonte, é usada de maneira ineficaz, comprovando que as atividades antrópicas têm produzido efeitos que afetam o equilíbrio e o funcionamento de comunidades naturais e até mesmo humanas.

No Brasil a demarcação do uso da água é um assunto complexo, influenciado diretamente pela qualidade e a disponibilidade hídrica. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), em 2022, o Brasil consumiu aproximadamente 64,18 trilhões de litros de água. Conforme apresentado no Gráfico 1, a irrigação usou volumes consideráveis representando 50,5% do total. Em segundo lugar, o abastecimento urbano com 23,9%, diferente do abastecimento rural com apenas 1,6%. Considerando outros setores, a dessedentação animal com cerca de 8%, a termelétrica com 5% e a mineração consumindo cerca de 1,6%.

Gráfico 1 - Distribuição em percentual dos usos da água.



Fonte: ANA (2024).

2.1 SISTEMAS DE COLETA E ARMAZENAMENTO

As tecnologias para a captação e armazenamento de água em regiões semiáridas são diversas, os projetos são adaptados às características locais. Entre elas, o uso de cisternas se destaca como uma solução eficaz.

O Programa Cisterna é regulamentado pela Lei nº 12.873/2013 e decreto nº 9.606/2018, essa política pública visa assegurar o acesso à água potável para localidades vulneráveis à seca, permitindo a produção de alimentos e o abastecimento para o consumo humano e a dessedentação de animais através do emprego de tecnologias sociais acessíveis e economicamente viáveis.

2.1.1 Cisterna de placa

A cisterna de placa, um dos modelos mais utilizados, é um reservatório subterrâneo que armazena a água pluvial. Este reservatório detém um raio de 1,7 m e uma profundidade de 1,20 m, configurado em formato cilíndrico, semienterrado e coberto, com capacidade para armazenar 16.000 litros.

A água proveniente dos telhados é direcionada por meio de calhas de PVC ou zinco até o recipiente de armazenamento. As paredes são construídas com placas de concreto, com aproximadamente $\frac{1}{3}$ da estrutura acima do nível do solo, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Cisterna de placa.

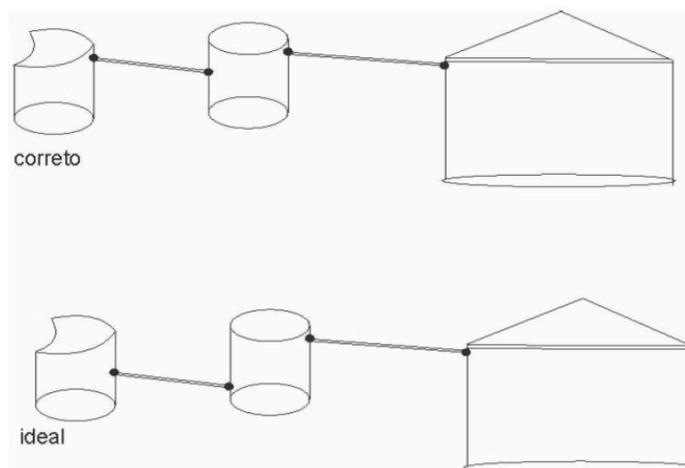


Fonte: Programa Cisterna - modelo nº 1 (2023).

2.1.2 Cisterna enxurrada

A cisterna de enxurrada, com a mesma capacidade de armazenamento que o calçadão, coleta a água das chuvas por gravidade e a direciona para decantadores, ilustrada na Figura 2, com profundidade 1,20 metros e 1,40 metros de diâmetro. Após remover os detritos, a água é armazenada em um reservatório cilíndrico, coberto e totalmente enterrado. Este reservatório é constituído por paredes de concreto pré-moldado e piso reforçado com malha de ferro, com profundidade de 1,8 metros e diâmetro interno de 6,20 metros.

Figura 2 - Desenho do posicionamento dos decantadores em relação à cisterna.



Fonte: Programa Cisterna - modelo nº 3 (2023).

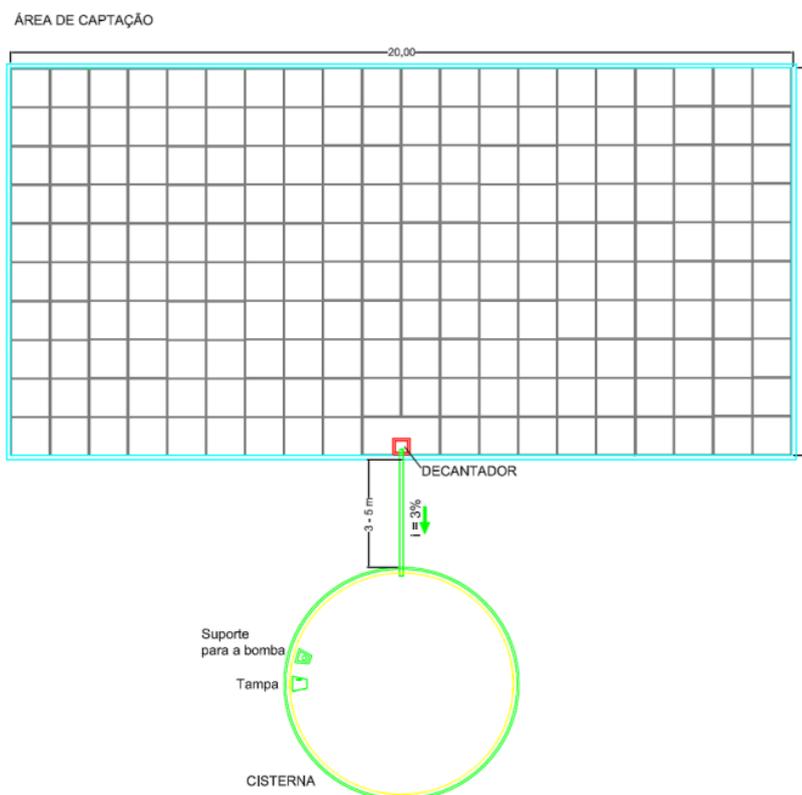
2.1.3 Cisterna calçadão

A cisterna calçadão é um reservatório de água no formato cilíndrico,

semienterrado e coberto, com raio de 3,2 metros e uma profundidade de 1,8 metros, capaz de armazenar 52.000 litros. A água da chuva é coletada em uma área denominada calçada com 200 m², delimitada por um meio fio que, com leve declive, direciona a água para a caixa de decantação e, em seguida, para o reservatório, conforme ilustrado na Figura 3.

Os decantadores podem ser circulares ou quadrados, com profundidade de 1,20 m e diâmetro de 1,40 m ou 1 x 1 x 1 m. Assim como a cisterna enxurrada, o terreno é um fator limitante, pois terrenos que apresentam declividade acima de 5% e muitas irregularidades, comprometem a durabilidade e encarecem a construção do calçada. As medidas dos lados do calçada variam conforme a área.

Figura 3 - Desenho esquemático da posição do calçada.



Fonte: Programa Cisterna - modelo nº 2 (2023).

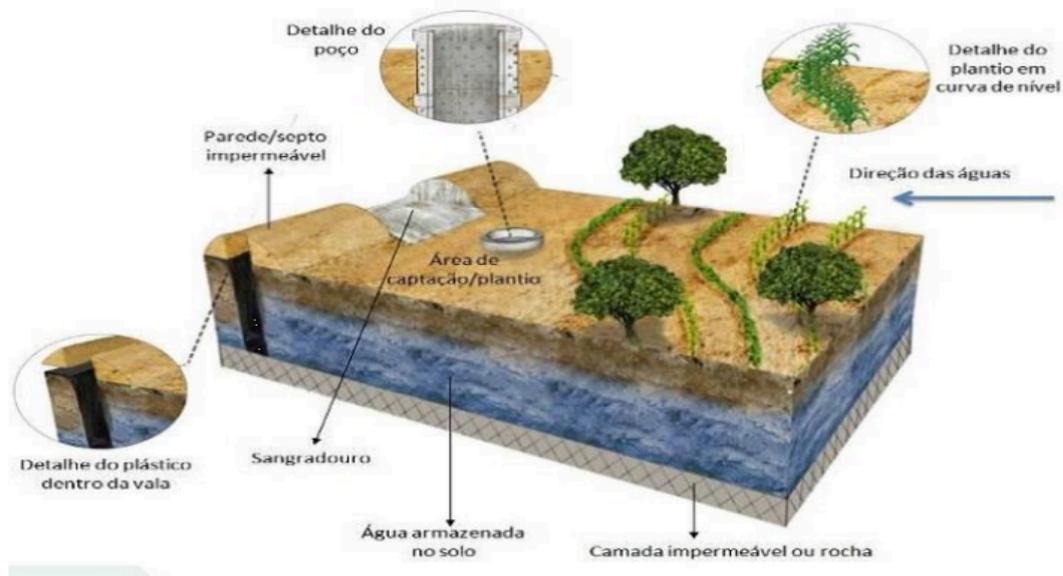
2.1.4 Barragem subterrânea

A barragem subterrânea é uma estrutura construída transversalmente ao fluxo de água em riachos e córregos temporários, ilustrada na Figura 4. Sua função é reter a água da chuva proporcionando a elevação do lençol freático. Existem dois tipos: barragem submersa e submersível.

Para sua construção, escava-se uma vala com profundidade suficiente para alcançar o leito impermeável. A largura da vala varia entre 0,6 e 0,8 metros, quando utilizada

a retroescavadeira, ou 1 metro, quando feita manualmente, por questão de segurança. Nessa vala, é instalada uma manta plástica flexível que atua como uma barreira impermeabilizante, formando um reservatório subterrâneo.

Figura 4 - Desenho ilustrativo da barragem subterrânea.



Fonte: Programa Cisterna - modelo nº 28 (2023).

2.2 DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA

A elevada salinidade da água em algumas regiões, decorrente das características geológicas, é um desafio para o abastecimento. A implementação de tecnologias simples e viáveis em pequenas comunidades permite o aumento da disponibilidade hídrica, beneficiando diretamente o bem-estar coletivo. Segundo Moccock *et al.* (2021) o uso de dessalinizadores é uma solução eficaz e cada vez mais comum em regiões que apresentam níveis elevados de sais na água, especialmente em período de estiagem, quando os tratamentos convencionais se mostram insuficientes para atender à demanda por água.

O Programa Água Doce é uma iniciativa do Governo Federal, em conjunto com instituições parceiras e a sociedade civil, que visa assegurar o fornecimento de água potável de qualidade em áreas vulneráveis à seca. Através da elaboração e implementação de projetos técnicos, o programa gerencia e recupera sistemas de dessalinização, tornando as águas salobras e salinas em água para o abastecimento humano e outras atividades na sociedade.

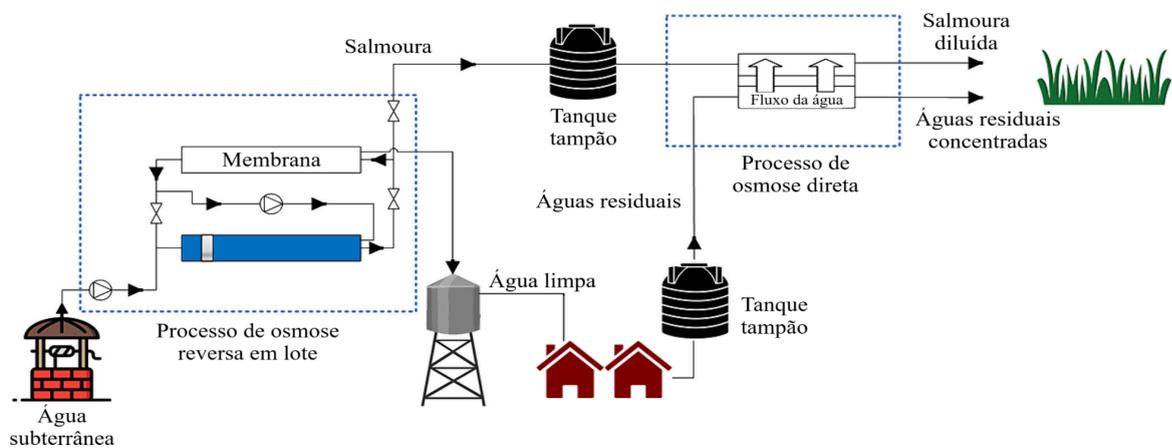
2.2.1 Osmose reversa

A osmose reversa é um processo de separação de substância mediante a utilização de uma membrana semipermeável, que age como uma barreira seletiva. Nesse processo, é

aplicada uma pressão externa superior à pressão osmótica (Soares *et al.*, 2022). Estudos, como o de Patel *et al.* (2024), exploraram a análise de exergia e paramétrica do sistema Osmose Reversa Integrada em lote de Água Salobra - Osmose Direta (BRO-FO), conforme exemplificado na Figura 5.

Os estudos indicaram que, embora a membrana de osmose reversa e a bomba sejam as principais responsáveis pela destruição de exergia, otimizações no processo podem reduzir significativamente essas perdas, permitindo analisar as condições operacionais ideais para máxima recuperação de água e redução de custos.

Figura 5 - Conceito de sistema integrado BRO-FO.



Fonte: Adaptado de Patel *et al.* (2023).

Patel *et al.* (2024) destacam a dessalinização como uma solução promissora para a escassez hídrica. No entanto, a implementação dessa tecnologia envolve custos consideráveis, influenciados por fatores como capacidade da planta, tipo de equipamento e características locais. A manutenção contínua também representa um gasto significativo, uma vez que demanda mão de obra especializada para garantir a eficiência do processo. O sistema BRO (*Backwashing Reverse Osmosis*) é uma tecnologia inovadora para dessalinização de água, especialmente útil para tratar água subterrânea. Neste sistema, a água bruta é extraída de um poço e submetida a um processo de tratamento em múltiplas etapas. A parte principal do sistema contém um vaso de pressão, onde realiza a troca de trabalho.

Dentro deste vaso, um pistão livre movimenta-se, separando as diferentes fases do processo. A membrana de osmose reversa (RO), do tipo espiral, é responsável por reter os sais e impurezas, permitindo a passagem apenas da água dessalinizada. Para controlar o fluxo de água e as diferentes fases, o sistema BRO utiliza três válvulas principais: a válvula principal, responsável por controlar o fluxo da água captada; a válvula de desvio, que direciona o fluxo

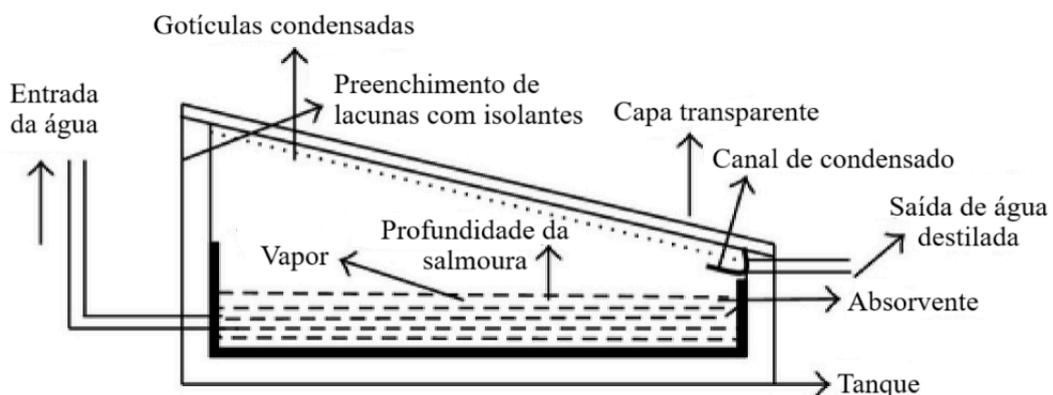
da água a ser tratada para as diferentes etapas do processo; e a válvula de purga e recarga, que controla a descarga da água concentra e a entrada de água bruta captada. Além disso, o consumo específico de energia (SEC) é significativamente menor, o que reduz os custos operacionais.

2.2.2 Destilador solar

O destilador solar é um sistema que utiliza a energia solar para transformar água salgada em água potável. Consiste em um reservatório contendo água salobra, coberto por uma superfície transparente inclinada. A radiação solar aquece a água, promovendo a evaporação e retirando as impurezas como sais e microrganismos. O vapor de água, ao encontrar a superfície mais fria, condensa, formando gotas de água limpa que escorrem para um coletor (Conserva *et al.*, 2023).

Além disso, Alaskaree (2023) observa que os dispositivos mais comuns são os de calhas de inclinação única, existindo outros modelos como o de cilindro oco. Eles são adaptáveis às demandas locais e podem ser melhorados por meio de refletores e sistemas de rastreamento solar, que intensificam a absorção solar pelo sistema. O autor, em seu estudo, investiga o desempenho de produção de água potável através de dois dispositivos de destilador solar, constituídos por uma bacia retangular com placa pintada de preto e vidro comum, e o outro com um espelho plano fixado na parte de trás da pia com inclinação de 30°, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama esquemático de um destilador solar convencional de inclinação única.

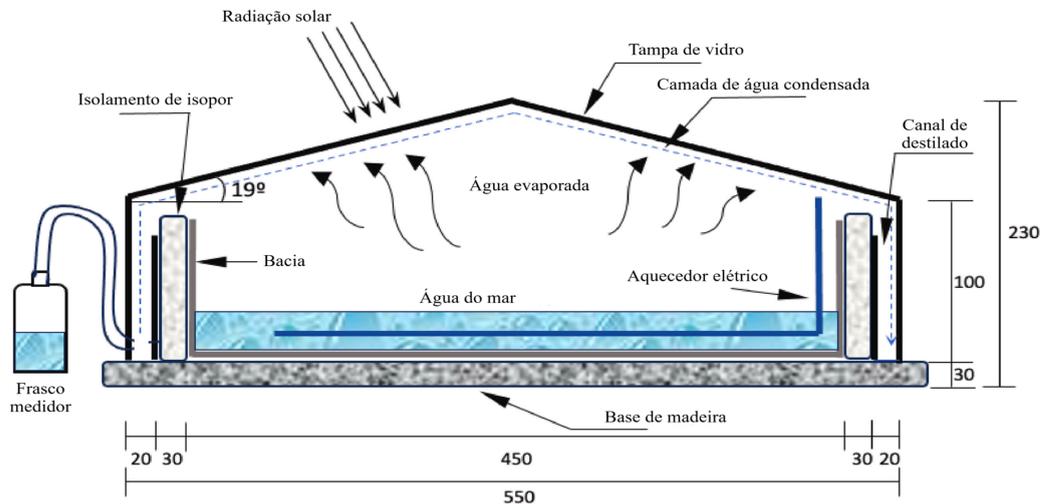


Fonte: Adaptado de Saxena (2016), *apud* Alaskaree (2023).

Segundo Diaz, Salgado e Herazo (2023), a técnica de dessalinização remove as impurezas dissolvidas na água, tornando-a adequada para o consumo por meio de processos

de separação que podem ser térmicos, elétricos ou de membrana. Essa técnica autossustentável proporciona economia, pois a manutenção é relativamente baixa em comparação ao tratamento por osmose reversa (Figura 7).

Figura 7 - Desenho esquemático do dessalinizador solar (unidade em mm).



Fonte: Adaptado de Diaz, Salgado e Herazo (2023).

2.3 REÚSO DE ÁGUA TRATADA

O Governo do Estado do Ceará, por intermédio da Secretaria das Cidades, em parceria com a Companhia de Água e Esgoto do Ceará, fortalece a resiliência das populações rurais, melhorando as condições de saneamento básico, ampliando o acesso, protegendo e gerindo os recursos hídricos. O programa busca melhorar a operação e manutenção das infraestruturas de saneamento, através do aprimoramento contínuo do modelo de gestão do Sistema Integrado de Saneamento Rural (SISAR).

O tratamento de águas residuais, como as águas cinzas, geradas após o uso em atividades domésticas, como chuveiros e pias, excluindo aquelas provenientes dos vasos sanitários. Essas águas, compostas por concentrações menores de matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos (Von Sperling e Sezerino, 2018), requerem, conseqüentemente, a aplicação de alternativas socioambientais e sustentáveis de tratamento e reutilização, permitindo a gestão estratégica de reaproveitamento desse recurso natural.

2.3.1 Sistema de aquaponia

O sistema de aquaponia combina tanque de peixe e filtros para o tratamento da água que são utilizadas em bancadas de hidroponia, ilustrado na Figura 8. A água dos tanques passa por um módulo de filtragem, que inclui decantador, filtro biológico e aeração para

remoção de sólidos e gases. O *sump* coleta a água filtrada e controla o pH com aditivos, retornando-a para os tanques ou bancadas de hidroponia por gravidade. O sistema integra o cultivo de peixes e plantas de forma sustentável (Queiroz *et al.*, 2017).

Oliveira *et al.* (2024) descrevem a aquaponia como um ecossistema formado por seres bióticos, como peixes, plantas e bactérias, com elementos abióticos, como água, ar e meios de cultivo. As águas residuais da aquicultura são ricas em nutrientes, como fósforo e nitrogênio, que servem de meio nutritivo para as plantas, proporcionando condições ideais para o seu crescimento.

O sistema funciona em um ciclo fechado, onde a água é recirculada e tratada por filtros biológicos. Esses filtros, através dos processos de nitrificação, convertem a amônia em nitrito e, posteriormente, em nitrato, devido à ação de bactérias como *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*. As plantas, por sua vez, absorvem esses compostos nitrogenados, contribuindo para o equilíbrio do sistema. Para garantir o bom funcionamento da aquaponia, é essencial o monitoramento regular dos parâmetros de pH, condutividade elétrica, temperatura e níveis de nutrientes.

O nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade pelas plantas, com a estabilização adequada ocorrendo entre 20 e 40 dias após a adição dos peixes. O pH é um parâmetro crítico e decisivo para o bom funcionamento do sistema; para as plantas, a faixa ideal é entre 5,5 e 6,5, enquanto para algumas espécies de peixes é entre 7 e 9. Por isso, o sistema é ajustado e controlado na faixa entre 6,5 e 7. Além disso, é importante acompanhar a condutividade elétrica da água para evitar alterações bruscas nos níveis de nutrientes dissolvidos, prevenindo a intoxicação dos peixes (Carneiro *et al.*, 2015; 2016).

Figura 8 - Sistema de aquaponia em canaletas na Universidade Federal de Lavras.



Fonte: Oliveira *et al.* (2024).

2.3.2 Sistema bioágua familiar

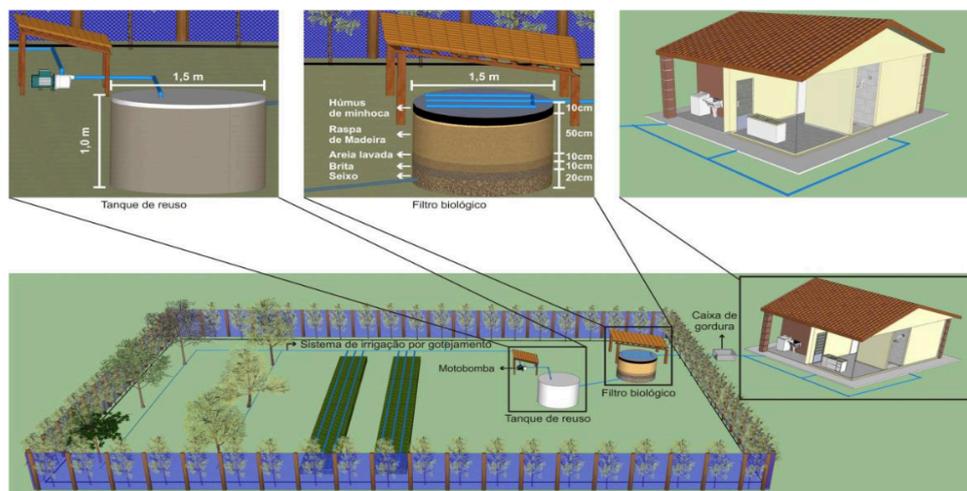
O sistema bioágua familiar conta com um processo de reuso da água cinza proveniente das residências (Figura 9). A água passa por um tratamento que inclui uma caixa de gordura, um filtro biológico aeróbico e um tanque de armazenamento. Em seguida, uma eletrobomba impulsiona a água tratada para um sistema de irrigação por gotejamento, garantindo assim a produção de alimentos (Barroso *et al.*, 2023).

Segundo Barroso *et al.* (2023), o sistema bioágua familiar é constituído por uma caixa de gordura, filtro biológico, tanque de reuso e um sistema de irrigação. Este sistema é eficiente e vantajoso, a implementação é relativamente baixa. Além disso, proporciona o cultivo de hortaliças e reduz os problemas pertinentes à poluição oriunda do esgoto doméstico. A água cinza, originada das atividades domésticas, passa inicialmente por uma caixa de gordura. Esse tratamento preliminar, evita a obstrução da tubulação, retendo a gordura e sólidos maiores.

Em seguida, a água é direcionada para o filtro biológico, que é composto por várias camadas de materiais filtrantes: primeiro, uma camada de 10 cm do minhocário, seguida por 50 cm de raspa de madeira, depois 10 cm de areia lavada e outra com 10 cm de brita, por fim, uma camada final de 20 cm de seixo.

O tanque de reuso armazena a água tratada, e distribui com auxílio de uma bomba para o sistema de irrigação por gotejamento. O tanque de reuso e o filtro biológico têm 1,5 m de largura e uma altura de 1 m. O minhocário ajuda a decompor a matéria orgânica, mantendo o solo aerado e melhorando a qualidade do filtro.

Figura 9 - Configuração das etapas no Bioágua familiar.



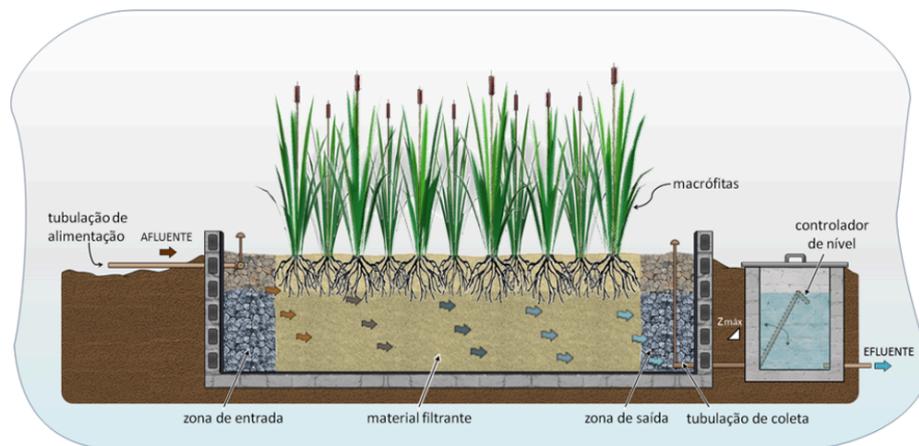
Fonte: IBV – Instituto Bem Viver.

Fonte: Barroso *et al.* (2023).

2.3.2 Sistema *wetlands* construídos

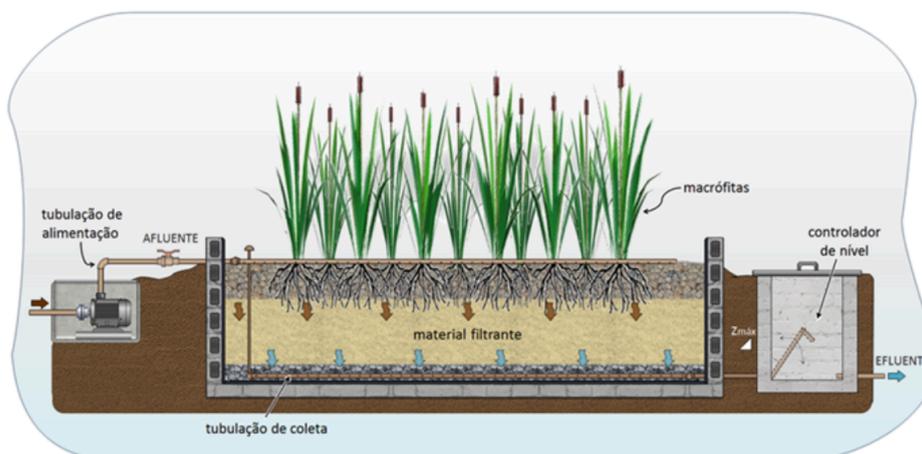
As *wetlands* construídos (WC) são sistemas artificiais, compostos por uma camada de substrato e uma camada de vegetação aquática, projetados para remover nutrientes e poluentes da água. Esses sistemas apresentam configurações subsuperficiais e superficiais. As unidades subsuperficiais apresentam diferentes modalidades de escoamento, podendo ser construídas com fundo saturado, ciclos de inundações e esvaziamentos, sistema francês, fluxo vertical descendente, fluxo ascendente, fluxo horizontal ou sistema híbrido. Já as unidades superficiais, possuem plantas emergentes, flutuantes, submersas ou com folhas flutuantes (Von Sperling e Sezerino, 2018; Sezerino e Silva, 2021). As Figuras 10 e 11 ilustram dois modelos de unidades do sistema subsuperficial, demonstrando suas diferenças quanto ao fluxo de escoamento.

Figura 10 - Desenho ilustrativo, unidade com escoamento horizontal (WCH).



Fonte: Sezerino e Silva (2021).

Figura 11 - Desenho ilustrativo, unidade com escoamento vertical (WCV).



Fonte: Sezerino e Silva (2021).

No Brasil, essa tecnologia é frequentemente utilizada no tratamento secundário de esgoto doméstico. Além disso, podem ser projetadas para o tratamento de águas residuárias industriais.

A modalidade de wetland construído mais recorrente é aquela com escoamento subsuperficial horizontal ou vertical, combinada com reatores tipo decanto-digestores implantados a montante, podendo ser estes os tanques sépticos ou reatores anaeróbios compartimentados, que possuem o objetivo de promover o tratamento primário no esgoto afluente, reduzindo, dessa forma, da fração líquida concentrações de sólidos em suspensão e da matéria orgânica particulada, representada indiretamente pela DBO particulada, produzindo, assim, um efluente líquido com menores concentrações desses compostos factíveis de serem conduzidos às unidades que empregam o processo de filtração (Sezerino e Silva, 2021, p. 13).

O sistema de *wetlands* construídos podem ser implementados de duas maneiras: sobre a superfície do solo ou em estrutura escavada. A escolha da configuração é determinada pelas características do local, requerendo estudos geotécnicos do solo para identificação do posicionamento do nível do lençol freático, visto que, as estruturas escavadas são frequentemente adotadas por apresentarem custos inferiores em comparação às construções da estrutura sobre a superfície do solo (Sezerino *et al.*, 2021).

3 METODOLOGIA

A pesquisa adotou uma abordagem descritiva com o objetivo de identificar e descrever as tecnologias sustentáveis mais comuns para o tratamento de água em regiões semiáridas brasileiras. Foram utilizados diferentes artigos científicos disponíveis nos principais bancos de dados: Periódicos Capes, ScienceDirect e Scopus. Adicionalmente, o Portal do Governo Brasileiro foi consultado para identificar programas e projetos governamentais relacionados a tecnologias sociais para o tratamento de água no semiárido.

Foram selecionados artigos, e-books e anexos publicados entre o período de 2014 e 2024. Nesse contexto, foram escolhidas palavras-chave específicas a cada tecnologia, como: tratamento de água, cisternas, semiárido brasileiro, dessalinizadores, entre outras relacionadas à temática. Utilizaram-se operadores booleanos (AND, OR, NOT) para filtrar documentos que não estavam relacionados ao objetivo da pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta revisão bibliográfica, foram analisadas nove tecnologias sustentáveis aplicadas ao tratamento de água no semiárido: barragem subterrânea, cisterna de placa, cisterna enxurrada, cisterna calçadão, destilador solar, osmose reversa, aquaponia, bioágua

familiar e *wetlands* construídos. Cada uma dessas soluções exibe características específicas e aplicabilidade variada. O Quadro 1, expõe as informações decorrentes do estudo de diversos autores.

Quadro 1 - Soluções hídricas para ambientes semiáridos.

TECNOLOGIA DE CAPTAÇÃO		
Modelo	Aplicabilidade	Vantagens
Barragem subterrânea	Abastecimento comunitário.	Maximiza a recarga dos aquíferos locais; Permite a resiliência das famílias; Alta capacidade de armazenamento.
Cisterna calçadão	Irrigação agrícola; Abastecimento comunitário ou individual.	Permite a captação de grandes volumes de água; Instalação prática; Minimiza os riscos de inundações.
Cisterna de placa	Abastecimento doméstico.	Fácil instalação; Baixo custo operacional; Requer menores áreas.
Cisterna enxurrada	Abastecimento comunitário ou individual; Irrigação agrícola.	Suporta áreas com alta pluviosidade; Instalação rápida; Maximização do volume coletado.
TECNOLOGIA DE DESSALINIZAÇÃO		
Modelo	Aplicabilidade	Vantagens
Osmose reversa	Tratamento de água salobra para comunidades.	Produz água potável em grandes volumes; Apresenta maior remoção de contaminantes e impurezas; Melhora a qualidade da água captada.
Destilador solar	Produção de água potável em pequena escala.	Fácil instalação; Baixo custo operacional; Utiliza energia renovável.
TECNOLOGIA DE REÚSO		
Modelo	Aplicabilidade	Vantagens
Sistema bioágua familiar	Tratamento de água cinza doméstica.	Favorece a sustentabilidade econômica; Promove a saúde através do tratamento de águas residuais.
Sistema de aquaponia	Produção de alimentos.	Sistema de reaproveitamento de água; Fortalece a agricultura familiar; Permite práticas agroecológicas.
Sistema <i>wetlands</i> construídos	Tratamento de águas residuárias domésticas ou industriais.	Baixo custo operacional; Flexibilidade; Melhora a paisagem local; Promove a saúde e bem-estar.

Fonte: Autoria própria (2024).

O governo federal e estadual oferece iniciativas de políticas públicas, por meio dos programas sociais como Cisternas, Águas Doces e Águas do Sertão, visando fornecer

água potável às famílias, especialmente aquelas de renda baixa e residentes em áreas com condições semiáridas. Esses programas, projetados para atender as necessidades básicas, oferecem soluções economicamente viáveis e condizentes com o ambiente, permitindo o uso racional dos recursos limitados pelas características locais.

A fase de implementação de algumas tecnologias sociais é marcada por custos elevados, influenciados por diversos fatores, como estudos de viabilidade, análise topográfica, flutuação de preços dos materiais para a construção conforme a região e a necessidade de uma equipe técnica especializada. O Programa Cisterna dispõe de diversas tecnologias sociais, dentre elas, cisterna (placa, enxurrada, calçadão) e a barragem subterrânea.

As cisternas são alternativas eficazes contra as problemáticas da seca periódica. Seu funcionamento consiste na captação da água pluvial em superfícies impermeáveis, como telhados, e seu armazenamento em reservatórios, normalmente subterrâneos. O modelo em placa tem como finalidade o abastecimento doméstico, enquanto o calçadão e a enxurrada são geralmente utilizados para uso em atividades agropecuárias e de irrigação. A barragem subterrânea aproveita as características naturais do solo, permitindo a infiltração da água da chuva, recarregando o aquífero e retendo parte dessa água para uso posterior em atividades antrópicas.

As águas subterrâneas salinas e salobras são tratadas através de tecnologias como osmose reversa e dessalinizadores solares, a escolha do método depende diretamente das necessidades de cada população. O sistema de osmose reversa se destaca em relação ao destilador solar. Estudos como o de Soares *et al.* (2022) e Patel *et al.* (2024) confirmam que a osmose reversa é uma excelente solução para localidades que demandam de grandes volumes de água potável, embora a manutenção do sistema seja relativamente cara, refletindo em possíveis problemas técnicos em localidade com recursos financeiros limitados.

Por outro lado, trabalhos como de Conserva *et al.* (2023) e Alaskaree (2023) sobre o destilador solar indicam que, por ser uma tecnologia simples e de manutenção relativamente baixa, ela não oferece o mesmo nível de produção. Por isso, é mais adequado para comunidades que requerem volumes consideravelmente menores.

Normalmente, os projetos são adaptados à realidade das famílias, e, por isso, é comum a combinação de uma ou mais tecnologias, seja para o uso individual ou comunitário. Um exemplo é o Programa Água Doce, que oferece uma solução simples e prática para o tratamento do rejeito do processo da osmose reversa. O sistema é composto por uma área com tanque de criação de peixes, evitando o lançamento do concentrado salino diretamente no solo. No entanto, essa prática requer o monitoramento contínuo para evitar problemas

ambientais decorrentes de uma gestão inadequada.

Sistemas como aquaponia e o bioágua familiar contribuem para a segurança hídrica e a produção de alimentos. Esses sistemas são projetados para tratar a água cinza das residências, utilizando filtros biológicos, permitindo o reaproveitamento dessa água para a irrigação. Diferenciados pelo método de construção, a aquaponia é a junção do sistema hidropônico com o tanque de peixe, enquanto o bioágua familiar é adicionado um minhocário na parte superior do filtro. A implementação dessas tecnologias no semiárido fortalece a agricultura familiar, promovendo o desenvolvimento socioeconômico e ambiental, em particular, devido às práticas agrícolas sustentáveis na região.

Além disso, as *wetlands* construídos, conforme descrito por Von Sperling e Sezerino (2018), são comumente utilizadas como uma etapa de tratamento secundário de águas residuárias, particularmente quando associadas a outros sistemas de tratamento, como a fossa séptica. No contexto do semiárido, essa tecnologia oferece alternativas simples e de fácil manutenção no tratamento de águas domésticas, ajudando na remoção dos nutrientes restantes, prevenindo a poluição ou contaminação da água e solo, originados devido o lançamento inadequado do efluente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias sociais são alternativas eficientes para resolução de conflitos específicos em regiões semiáridas, permitindo a sustentabilidade, e reduzindo os impactos socioambientais e econômicos. Em situações específicas, a combinação de uma ou mais tecnologias é necessária, o que exige investimentos iniciais elevados e gestão técnica. Os projetos são personalizados, abrangendo todas as etapas, desde a captação até o tratamento e reaproveitamento de água. Pois a falta de infraestrutura para coleta e tratamento da água é extremamente precária em localidades rurais.

O monitoramento contínuo, uma ação essencial, permite avaliar o desempenho e o tempo para a restauração ou ampliação dos sistemas. A elaboração de projetos sustentáveis e acessíveis para famílias em regiões semiáridas contribui na minimização das condições adversas, como a seca, promovendo o bem-estar comunitário. Além disso, as iniciativas de educação ambiental, possibilitam diminuir os impactos ambientais decorrentes dos maus hábitos, conscientizando a população para adoção de ações mais sustentáveis.

As instituições de ensino superior, por meio de pesquisas, viabilizam a aplicação de tecnologias em localidades com recursos financeiros limitados, enquanto as comunidades colaboradoras oferecem áreas experimentais para coleta de dados que ajudam a resolver

problemas locais. Essa parceria é mutuamente benéfica, permitindo avaliar os tratamentos em diferentes condições regionais, reconhecendo as limitações e identificando as partes que requerem melhoria.

Os programas do Governo Federal ampliam o acesso à água potável, melhoram a qualidade de vida das famílias por meio de ações que fortalecem a agricultura familiar, aumentando a capacidade produtiva e conservando os ecossistemas locais. Apesar dos desafios, essas ações também visam melhorar a gestão dos recursos hídricos, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil atualiza informações sobre águas do País. 2024. Disponível em: [https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-atualiza-informacoes-sobre-aguas-do-pais#:~:text=Em%202022%2C%20a%20retirada%20total.ind%C3%BAstria%20\(9%2C4%25\)](https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-atualiza-informacoes-sobre-aguas-do-pais#:~:text=Em%202022%2C%20a%20retirada%20total.ind%C3%BAstria%20(9%2C4%25).). Acessado em: 21 dez. 2024.

ALASKAREE, Ekram Hadi. An experimental investigation of the solar distiller basin's performance using a flat mirror and vertical barriers. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016423001214>. Acesso em: 21 dez. 2024.

ARAÚJO FILHO, José Coelho de; MARQUES, Flávio Adriano; AMARAL, André Julio do; CUNHA, Tony Jarbas Ferreira; SOUZA JÚNIOR, Valdomiro Severino de; GALVÃO, Pauliana Valéria Machado. Solos do Semiárido: Características e estoque de carbono. 2022. In: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (Org.). Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. cap. 6, p. 93-112. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1150137/1/Solos-do-Semiarido-2022>. Acesso em: 08 set. 2024.

BARROSO, Andréia de Araújo Freitas; NASCIMENTO, Francisco Jonathan de Sousa Cunha; CHAVES, Jarbas Rodrigues; LIMA, Paulo de Freitas; SANTOS, Hosineide de Oliveira Rolim dos. QUALIDADE DAS ÁGUAS CINZA GERADAS PELO SISTEMA BIOÁGUA FAMILIAR PARA REÚSO AGRÍCOLA NO CEARÁ. IRRIGA, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 592–601, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n3p592-601. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4707>. Acesso em: 27 nov. 2024.

CARNEIRO, Paulo César Falanghe. MORAIS, Carlos Adriano Rocha Silva; NUNES, Maria Urbana Corrêa; MARIA, Alexandre Nizio; FUJIMOTO, Rodrigo Yudi. Produção Integrada de Peixes e Vegetais em Aquaponia. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/142630/1/Doc-189.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2024.

CARNEIRO, Paulo César Falanghe; MARIA, Alexandre Nizio; FUJIMOTO, Rodrigo Yudi; NUNES, Maria Urbana Correia. Sistema Familiar de Aquaponia em Canaletas. 2016. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1064917>. Acesso em: 1 nov. 2024.

CONSERVA, Vanessa Rosales; SARMENTO, Kênia Kelly Freitas; SILVA, Karyna Steffane da; SILVA, Kelly Cristine; SILVA, Camylla Barbosa; MENESES, Rafaela Cabral de Araújo; MEDEIROS, Keila Machado de; LIMA, Carlos Antônio Pereira de. Uma revisão sobre desempenho de dessalinizadores solar no Brasil. Cuadernos de Educación y Desarrollo, [S. l.], v. 15, n. 9, p. 9644–9663, 2023. DOI: 10.55905/cuadv15n9-088. Disponível em: <https://ojs.cuadernoseducacion.com/ojs/index.php/ced/article/view/1498>. Acesso em: 17 dez. 2024.

DÍAZ, Jhon Jairo Feria; SALGADO, Boris A. Medina; HERAZO, Luis Carlos Sandoval. Mild hybrid energy dual-slope solar stills: Design and performance. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023006977>. Acesso em: 21 dez.

2024.

GONÇALVES, Frederico Augusto Alves; RODRIGUES, Paulo César Horta; CÁCERES, Natalia Duarte. 2020. Como cultivar a Água? In: CEDEFES, 2020, Eixo II do Projeto Quilombo Vivo: Apoio e fortalecimento dos quilombolas do Serro – Minas Gerais, p. 28.

Disponível em:

<https://www.gov.br/cdtn/pt-br/assuntos/noticias/quilombo-vivo-cdtn-atua-em-projeto-com-comunidades-quilombolas-do-serro-mg/cartilha-4-como-cultivar-a-agua.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2024.

GOVERNO FEDERAL. Ministério do Desenvolvimento Social. Modelo da tecnologia social de acesso à água nº 02: Cisterna calçadão de 52 mil litros. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mds/pt-br/acoes-e-programas/aceso-a-alimentos-e-a-agua/programa-cisternas/tecnologias-sociais/modelo_02/in_n_10_2023_anexo.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

GOVERNO FEDERAL. Ministério do Desenvolvimento Social. Modelo da tecnologia social de acesso à água nº 03: Cisterna de enxurrada de 52 mil litros. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mds/pt-br/acoes-e-programas/aceso-a-alimentos-e-a-agua/programa-cisternas/tecnologias-sociais/modelo_03/in_n_30_2023_anexo.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

GOVERNO FEDERAL. Ministério do Desenvolvimento Social. Modelo da tecnologia social de acesso à água nº 01: Cisterna de placas de 16 mil litros. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mds/pt-br/acoes-e-programas/aceso-a-alimentos-e-a-agua/programa-cisternas/tecnologias-sociais/modelo_01/in_n_09_2023_anexo.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

GOVERNO FEDERAL. Ministério do Desenvolvimento Social. Modelo da tecnologia social de acesso à água nº 28: Barragem subterrânea. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mds/pt-br/acoes-e-programas/aceso-a-alimentos-e-a-agua/programa-cisternas/tecnologias-sociais/modelo_28/in_n_32_2023_anexo.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

GOVERNO FEDERAL. Ministério da saúde. Cartilha: Cuidados com a água e os alimentos. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/svsa/doencas-diarreicas-agudas/cartilha-cuidados-com-a-agua-e-os-alimentos/view>. Acesso em: 16 nov. 2024.

GOVERNO FEDERAL. Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome. Programa Cisternas. Disponível em: <https://www.gov.br/mds/pt-br/acoes-e-programas/aceso-a-alimentos-e-a-agua/programa-cisternas>. Acessado em: 15 nov. 2024.

GOVERNO FEDERAL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/programa-agua-doce>. Acessado em: 16 jan. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Secretaria das Cidades. Programa Águas do Sertão. Disponível em: <https://www.cidades.ce.gov.br/programa-aguas-do-sertao>. Acessado em: 16 jan. 2025.

KIILL, Lucia Helena Piedade; ARAÚJO, Francisco Pinheiro de; ANJOS, Jose Barbosa dos;

FERNANDES JÚNIOR, Paulo Ivan; AIDAR, Saulo de Tarso; SOUZA, Ana Valeria Vieira de. Biodiversidade da Caatinga como potencialidade para a agricultura familiar. In: MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V. (Org.). Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido. Brasília, DF, Embrapa, 2019. cap. 1, p. 15-43. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1118487>. Acessado em: 21 nov. 2024.

MELO, Roseli Freire de; SIMÕES, Welson Lima; PEREIRA, Lúcio Alberto; BRITO, Luiza Teixeira de Lima; FERREIRA, Elvis Pantaleão; BARROS, Luciano Cordoval de; RIBEIRO, Paulo Eduardo de Aquino. Água para o Fortalecimento dos sistemas agrícolas dependentes de chuva. In: MELO, R. F.; VOLTOLINI, T. V. (Org.). Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido. Brasília - DF: 2019. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1114220>. Acesso em: 21 nov. 2024.

MOCOOCK, Juliana Ferreira; PESSÔA, Clarissa Nogueira; MONTEIRO, Ângela Tainá da Silva; TORRES, Antônio Sérgio Caseira Gonçalves; RABBANI, Emilia Rahnemay Kohlman. Estudo comparativo entre os principais métodos de dessalinização de águas subterrâneas: Revisão de literatura. Águas Subterrâneas, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29287>. Acesso em: 27 nov. 2024.

OLIVEIRA, Diana Carla Fernandes; MIRANDA, Ana Luiza de Souza; PAULINO, Renan Rosa; BORGES, Rafael Antônio; GOMES, Maria Emília de Sousa; FREITAS, Rilke Tadeu Fonseca de. Aquaponia: a integração entre peixes e plantas: revisão de literatura. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, [S. l.], v. 7, n. 3, p. e 71372, 2024. DOI: 10.34188/bjaerv7n3-015. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/71372>. Acesso em: 12 dez. 2024.

OMAR, Bait. A review of clean and sustainable water production via curved desalinators: A super recent data. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624202459?via%3Dihub>. Acesso em: 27 nov. 2024.

PATEL, Dhaval; MUDGAL, Anurag; PATEL, Vivek; PATEL, Jatin; PARK, Kiho; DAVIES, Philp; DHAKAL, Nirajan. Exergy analysis for enhanced performance of integrated batch reverse osmosis – Forward osmosis system for brackish water treatment. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916424002595?via%3Dihub>. Acessado em: 20 dez. 2024.

QUEIROZ, Julio Ferraz de; FREATO, Thiago Archangelo; LUIZ, Alfredo José Barreto; ISHIKAWA, Márcia Mayumi; FRIGHETTO, Rosa Toyoko Shiraishi. Boas práticas de manejo para sistemas de aquaponia. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/178041/1/2018DC01.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SARMENTO, Kênia Kelly Freitas; ARAÚJO, Bruna Aline; SOUZA, José Everton Soares de; REBOUÇAS, Larissa Dias; MEDEIROS, Keila Machado de; LIMA, Carlos Antônio Pereira de. Aplicação da destilação solar na potabilização de águas contaminadas. 2021. Disponível

em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/19644/17573/241415>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SEZERINO, Pablo Heleno; SILVA, Arieleen Reis da. Aplicabilidade dos wetlands construídos no tratamento de esgoto sanitário e doméstico. 2021. In: SEZERINO, P. H.; PELISSARI, C. Wetlands Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: Experiências Brasileiras. cap. 1, p. 9-27. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/files/2021/02/E-book-WETLANDS-BRASIL-Experi%C3%AAsncias-Brasileiras-1.pdf>. Acessado em: 16 dez. 2024.

SILVA NETTO, Joviniano Pereira da. PANORAMA DA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 241–258, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.59306/rgsa.v11e22022241-258>. Acessado em: 14 nov. 2024.

SILVA, Pedro Carlos Gama Da; MOURA, Magna Soelma Beserra de; KIILL, Lucia Helena Piedade; BRITO, Luiza Teixeira De Lima; PEREIRA, Lucio Alberto; SA, Iedo Bezerra; CORREIA, Rebert Coelho; TEIXEIRA, Antonio Heriberto de C.; CUNHA, Tony Jarbas Ferreira; GUIMARÃES FILHO, Clóvis. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (Ed.). Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. cap. 1, p. 18-48. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/861906>. Acessado em: 14 nov. 2024.

SOARES, Ricardo; SOARES, Agatha Cistinne Prudêncio; MAESTÁ, Beatriz César; LIPPI, Marcelo; CUNHA, Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da. Evaluation of the efficiency of Reverse Osmosis in the treatment of sanitary landfill leachate in the Metropolitan Region of the Rio de Janeiro. 2022. Disponível: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20220059>. Acesso em: 27 nov. 2024.

TAVARES, Válter Cardoso; ARRUDA, Ítalo Rodrigo Paulino de; SILVA, Danielle Gomes da. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/2177-5230.2019v34n70p385>. Acesso em: 21 nov. 2024.

VILAR DE BRITO, Yohanna Jamilla; CARDOSO, Maria Karolina Borba; SILVA, Karyna Steffane da; SILVA, Camylla Barbosa; MEDEIROS, Keila Machado de; LIMA, Carlos Antônio Pereira de. Estudo experimental de um dessalinizador solar do tipo bandeja com dupla inclinação para potabilização de água no semiárido paraibano. Águas Subterrâneas, [S. l.], v. 34, n. 2, p. 156–165, 2020. DOI: 10.14295/ras.v34i2.29773. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29773>. Acesso em: 27 nov. 2024.

VON SPERLING, Marcos. SEZERINO, Pablo Heleno. Dimensionamento de Wetlands construídos no Brasil. 2018. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/files/2018/12/Boletim-Wetlands-Brasil-Edi%C3%A7%C3%A3o-Especial-Dimensionamento-de-Wetlands-Constru%C3%ADdos-no-Brasil-von-Sperling-Sezerino-2018-2.pdf>. Acessado em: 14 nov. 2024.