

TRATAMENTO DE ÁGUA POR FILTRO LENTO DE AREIA EM DUPLA CAMADA: EFICIÊNCIA, SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA HÍDRICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

**Silvia Helena Assis Oliveira Barbosa,
Ícaro Thiago Andrade Moreira**

Resumo

A escassez de água e as desigualdades no acesso a sistemas de abastecimento representam desafios históricos para o semiárido brasileiro, demandando soluções tecnológicas sustentáveis e socialmente adequadas. Este artigo tem como objetivo analisar a eficiência do filtro lento de areia em dupla camada como alternativa de tratamento descentralizado de água, com base em revisão de literatura e estudo de caso realizado na comunidade rural de Pilar, município de Jaguarari, Bahia. A metodologia adotada combinou pesquisa bibliográfica e análise de relatórios técnicos, além da observação empírica do sistema implantado, que consiste na análise de camadas de antracito e areia fina para otimizar a filtração e promover a remoção de turbidez e microrganismos. Os resultados demonstraram reduções superiores a 99% na concentração de coliformes e turbidez residual inferior a 1,0 NTU, atendendo aos parâmetros da Portaria GM/MS nº 888/2021. O desempenho técnico, aliado à simplicidade de operação e ao envolvimento comunitário, confirma o potencial da tecnologia como instrumento de segurança hídrica e inclusão social. Conclui-se que o filtro lento de areia em dupla camada constitui uma solução eficaz, replicável e de baixo impacto ambiental, alinhada aos princípios dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, especialmente o ODS 6, que trata do acesso universal à água potável e saneamento seguro.

Palavras-chave

filtro lento de areia; dupla camada; segurança hídrica; saneamento rural; tecnologia social.

Abstract Water scarcity and unequal access to supply systems remain critical challenges in Brazil's semiarid region, requiring sustainable and socially appropriate technological solutions. This study aims to analyze the efficiency of the dual-media slow sand filter as a decentralized water treatment alternative, based on a literature review and a case study conducted in the rural community of Pilar, municipality of Jaguarari, Bahia. The methodology combined a comprehensive bibliographic review of scientific databases and technical reports with empirical observation of a system built using anthracite and fine sand layers to optimize filtration and improve turbidity and microorganism removal. The results showed reductions above 99% in coliform concentrations and residual turbidity below 1.0 NTU, meeting the potability standards established by Ordinance GM/MS No. 888/2021. The technical performance, coupled with operational simplicity and community engagement, confirms the technology's potential as a tool for water security and social inclusion. It is concluded that the dual-media slow sand filter constitutes an effective, replicable, and environmentally low-impact solution aligned with the principles of the United Nations 2030 Agenda for Sustainable Development, particularly SDG 6, which promotes universal access to safe and potable water.

Keywords slow sand filter; dual media; water security; rural sanitation; social technology.

INTRODUÇÃO

O acesso à água potável constitui um direito humano fundamental e um dos pilares centrais do desenvolvimento sustentável, sendo reconhecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) desde 2010 como requisito essencial à dignidade humana e à qualidade de vida (Un-Water, 2013). No entanto, em diversas regiões do Brasil, especialmente no semiárido nordestino, a escassez de recursos hídricos e a precariedade dos sistemas convencionais de abastecimento comprometem o atendimento regular e seguro das populações rurais (Fundação Nacional de Saúde, 2015; Instituto Nacional do Semiárido, 2021). Nesse contexto, a adoção de tecnologias sociais de baixo custo e fácil operação, como o filtro lento de areia em dupla camada, tem se consolidado como alternativa eficaz para ampliar o acesso à água potável e promover segurança hídrica em comunidades vulneráveis (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2006; World Health Organization, 2022).

A segurança hídrica, conforme definida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) pela Agência das Nações Unidas para Água (ONU-Água), consiste na capacidade de uma sociedade garantir água em quantidade e qualidade adequadas, assegurando a saúde humana, o desenvolvimento econômico e a proteção dos ecossistemas (Un-Water, 2013; World Health Organization, 2022). Esse conceito está diretamente associado ao Objetivo

de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 6, que visa “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e do saneamento para todos” (World Health Organization, 2022). Para o Brasil, alcançar essa meta implica superar desafios históricos de desigualdade no acesso e aprimorar a gestão descentralizada dos recursos hídricos, conforme previsto na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Lei nº 9.433/1997) e no Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) (Brasil, 2014).

Dentro desse panorama, o filtro lento de areia destaca-se como uma das tecnologias de tratamento mais antigas e eficientes do mundo, reconhecida por sua capacidade de remoção de turbidez, coliformes e patógenos sem a necessidade de produtos químicos ou equipamentos complexos (Abdiyev; Liu; Zhang; Li; Jiang, 2023; Huisman; Wood, 1974). Seu funcionamento baseia-se em mecanismos físicos, biológicos e químicos, nos quais a camada biológica superficial – conhecida como *schmutzdecke* – atua como barreira natural contra impurezas, bactérias e vírus (Fitriani; Abdullah; Rahman; Omar, 2020; Maiyo; Omondi; Muema, 2023). Nas versões de dupla camada, geralmente compostas por areia e antracito ou areia e carvão ativado granular, obtém-se uma maior eficiência hidráulica e melhor desempenho na remoção de matéria orgânica dissolvida e metais pesados, como ferro, manganês e chumbo (Baraee; Aryaee; Ghorbani; Samadi, 2016; Haukelidsaeter; Braaten; Steinsvik; Ratnaweera, 2023).

A Fundação Nacional de Saúde (Funasa) (Fundação Nacional de Saúde, 2015) e a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (Codevasf) (2021) vêm demonstrando resultados expressivos na adoção dessa tecnologia em comunidades rurais do Nordeste, confirmando reduções significativas nos índices de turbidez (< 1,0 NTU), coliformes totais e metais pesados. Essas evidências reforçam a viabilidade do filtro lento de areia em dupla camada como solução descentralizada, compatível com os princípios da gestão participativa e integrada dos recursos hídricos (Brasil, 2021; Environmental Protection Agency, 2021). Além disso, o sistema apresenta vantagens adicionais: requer baixa energia, tem manutenção simples, promove autonomia comunitária e pode ser construído com materiais locais (Di Bernardo; Dantas, 2017; Fundação Nacional de Saúde, 2006).

Pesquisas recentes destacam também a importância da gestão operacional e do controle de qualidade da água filtrada, uma vez que a eficiência do sistema depende da adequada taxa de filtração, da limpeza superficial periódica e da maturação da camada biológica (Abdiyev; Liu; Zhang; Li; Jiang, 2023; Environmental Protection Agency, 2024). A Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde estabelece os parâmetros nacionais de potabilidade e as exigências de vigilância da água para consumo humano, incluindo limites de turbidez, coliformes, pH e concentração de metais (Brasil, 2021). O cumprimento desses parâmetros, aliado à adoção de práticas de operação corretas, garante que os filtros lentos atendam às normas de segurança sanitária vigentes (U.S. Environmental Protection Agency, 1991; World Health Organization, 2022).

A partir dessa fundamentação, percebe-se que o filtro lento de areia em dupla camada contribui não apenas para a melhoria da qualidade da água, mas também para o fortalecimento da

resiliência hídrica e da gestão comunitária sustentável, pilares essenciais da segurança hídrica em regiões semiáridas (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2018). Trata-se, portanto, de uma tecnologia social ambientalmente adequada, economicamente acessível e cientificamente validada, capaz de reduzir a vulnerabilidade das populações frente às irregularidades climáticas e à contaminação dos mananciais subterrâneos e superficiais.

A motivação deste estudo decorre da necessidade de compreender, analisar e difundir o uso dessa tecnologia como instrumento estratégico de promoção da segurança hídrica, especialmente em áreas com infraestrutura precária. Dessa forma, este artigo tem como objetivo analisar as evidências técnicas e operacionais do uso do filtro lento de areia em dupla camada na produção de água potável, por meio de uma revisão de literatura e de um estudo de caso desenvolvido na comunidade rural de Pilar, município de Jaguarari, Bahia – região onde essa tecnologia foi aplicada e avaliada sob a ótica da sustentabilidade e da eficiência sanitária (Barbosa, 2023).

Ao propor uma reflexão técnica e social sobre essa tecnologia, pretende-se contribuir para o fortalecimento das políticas públicas de saneamento rural, alinhadas aos princípios da segurança hídrica, da sustentabilidade ambiental e da inclusão social. A relevância do tema se justifica, portanto, por sua interface entre ciência, gestão pública e bem-estar coletivo, além de sua aderência direta aos ODS da Agenda 2030 (ONU, 2015), em especial ao ODS 6 – Água Potável e Saneamento – e ao ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A gestão e o uso racional da água potável têm se tornado temas centrais nas discussões contemporâneas sobre sustentabilidade, saúde pública e desenvolvimento socioambiental. A crescente pressão sobre os recursos hídricos, impulsionada pelo crescimento populacional, pela urbanização desordenada e pelos efeitos das mudanças climáticas, tem exigido da sociedade soluções inovadoras, descentralizadas e sustentáveis para o abastecimento de água. Nesse contexto, o filtro lento de areia em dupla camada se consolida como uma das tecnologias mais relevantes para o tratamento de água em comunidades de pequeno porte e áreas rurais, especialmente por sua eficiência, simplicidade operacional e baixo custo de implantação (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2015; World Health Organization, 2022).

Historicamente, a filtração lenta de areia foi desenvolvida na Europa durante o século XIX, sendo posteriormente adotada em larga escala nos Estados Unidos e em outros países como método primário de tratamento de água (Huisman; Wood, 1974). Sua eficiência baseia-se na interação entre processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem dentro do leito filtrante, composto por areia de granulometria fina e suporte de cascalho. O elemento mais característico do sistema é a camada biológica superficial, denominada *schmutzdecke*, que atua como uma barreira natural, promovendo a remoção de microrganismos e matéria orgânica dissolvida (Fitriani; Abdullah; Rahman; Omar, 2020; Maiyo; Omondi; Muema,

2023). Essa camada, formada por algas, bactérias e protozoários, se desenvolve após alguns dias de operação, garantindo a estabilização microbiológica e o aumento da eficiência do processo (Abdiyev; Liu; Zhang; Li; Jiang, 2023).

A partir da década de 1970, a OMS passou a reconhecer a filtração lenta como uma das tecnologias mais apropriadas para comunidades sem acesso a sistemas convencionais de tratamento, destacando sua robustez, resiliência operacional e alta taxa de remoção de coliformes e vírus entéricos (World Health Organization, 2022). Segundo a mesma instituição, a filtração lenta é capaz de remover até 99% dos patógenos, desde que as taxas de filtração e as condições operacionais sejam mantidas dentro dos parâmetros recomendados. No Brasil, a adoção dessa tecnologia se intensificou nas últimas décadas, especialmente em programas da Funasa e da Codevasf voltados ao saneamento rural e à promoção da segurança hídrica no semiárido nordestino (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2006). Essas iniciativas têm como foco a disseminação de soluções tecnológicas apropriadas que conciliem simplicidade, baixo custo e eficiência sanitária, características essenciais para atender populações em situação de vulnerabilidade hídrica.

O conceito de segurança hídrica, fundamental para compreender a relevância dessa tecnologia, ultrapassa o enfoque técnico do tratamento de água e abrange dimensões sociais, econômicas e ambientais. De acordo com a Un-Water (2013), segurança hídrica é a capacidade de uma sociedade garantir, de forma sustentável, o acesso à água em quantidade e qualidade adequadas para a saúde humana, a preservação dos ecossistemas e o desenvolvimento econômico. Essa abordagem tem sido incorporada em políticas públicas e marcos normativos brasileiros, como a Lei nº 9.433/1997, que institui a PNRH, e o Plansab, que enfatiza a universalização do acesso à água potável como condição essencial para a redução das desigualdades regionais (Brasil, 2014).

No campo técnico, diversos estudos apontam que a filtração lenta de areia é capaz de atender aos parâmetros de potabilidade definidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece os limites máximos permitidos para turbidez, coliformes, pH e metais pesados (Brasil, 2021). Abdiyev, Liu, Zhang, Li e Jiang (2023) destacam que, sob taxas de filtração inferiores a $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$, é possível atingir turbidez residual inferior a 1,0 NTU, o que se enquadra nos padrões nacionais e internacionais de potabilidade. Resultados semelhantes foram relatados por Haukelidsaeter, Braaten, Steinsvik e Ratnaweera (2023) ao observarem que filtros lentos de dupla camada mantêm desempenho estável mesmo após longos períodos de operação, evidenciando a contribuição da camada biológica e da dupla mídia na remoção de ferro e manganês. Já Fitriani, Abdullah, Rahman e Omar (2023) demonstram que a alternância na granulometria das camadas permite melhor distribuição do fluxo hidráulico e prolonga o tempo entre limpezas, favorecendo a eficiência do sistema.

O uso da dupla camada – combinação de areia e antracito ou areia e carvão ativado granular – surgiu como evolução dos sistemas convencionais de filtração lenta, visando aumentar a capacidade de retenção de partículas e reduzir a perda de carga hidráulica (Baraee; Aryaee;

Ghorbani; Samadi, 2016). O antracito, por possuir densidade menor e estrutura mais porosa que a areia, atua como meio filtrante preliminar, distribuindo o fluxo e evitando a obstrução precoce da camada inferior. Essa configuração melhora a penetração da matéria orgânica dissolvida, otimizando a biodegradação na *schmutzdecke* e aumentando a eficiência na remoção de compostos coloidais e metais (Di Bernardo; Dantas, 2017). Segundo a Environmental Protection Agency (Environmental Protection Agency, 2021), esse tipo de arranjo proporciona maior estabilidade hidráulica, maior vida útil do filtro e melhor qualidade da água filtrada, sendo amplamente utilizado em países como Irlanda, Noruega e Canadá.

No contexto brasileiro, a Codevasf (2021) implementou projetos-piloto de filtros lentos de areia em dupla camada em comunidades do semiárido baiano, onde foram observadas reduções expressivas na turbidez da água e na incidência de doenças de veiculação hídrica. Esses resultados corroboram o caráter de tecnologia social do sistema, uma vez que a simplicidade de operação e manutenção permite o gerenciamento comunitário e a apropriação local da solução. Essa característica é destacada também pela Funasa (2015), que defende o uso do filtro lento como ferramenta de promoção da saúde pública e da inclusão social, integrando o conceito de saneamento como direito humano e como componente da segurança hídrica.

A eficiência dessa tecnologia está intimamente ligada à manutenção da camada biológica superficial, à qualidade da areia e à constância das taxas de filtração. Segundo Huisman e Wood (1974), o equilíbrio entre as atividades biológicas e a permeabilidade hidráulica do leito é essencial para garantir resultados consistentes. Durante o funcionamento contínuo, o filtro desenvolve um ecossistema microbiano capaz de degradar compostos orgânicos e inativar microrganismos patogênicos, fenômeno que depende da maturação adequada da *schmutzdecke* e da oxigenação suficiente nas camadas superiores. Quando o desempenho diminui, realiza-se a raspagem superficial, que remove cerca de dois centímetros de areia e restaura a capacidade do filtro, preservando as camadas inferiores (Environmental Protection Agency, 2024; World Health Organization, 2022). Essa simplicidade operacional torna o sistema ideal para comunidades rurais, escolas e unidades de saúde de pequeno porte, onde não há pessoal técnico especializado.

Em relação à qualidade da água produzida, diversos estudos internacionais confirmam a elevada taxa de remoção de microrganismos. Abdiyev, Liu, Zhang, Li e Jiang, (2023) e Maiyo, Omondi e Muema (2023) relatam que a eficiência do filtro lento de areia alcança entre 2 e 4 logs de remoção para vírus entéricos e protozoários como *Giardia* e *Cryptosporidium*, níveis comparáveis aos obtidos em sistemas de filtração rápida com coagulação. Essa equivalência técnica, associada ao baixo custo operacional, reforça a relevância da tecnologia para o alcance das metas de saúde pública em regiões carentes. No estudo conduzido por Fitriani, Abdullah, Rahman e Omar (2020), observou-se que o uso de dupla camada reduziu em até 30% a frequência de limpeza, indicando um aumento substancial da eficiência hidráulica e da estabilidade biológica. Além disso, os autores ressaltam que a filtração lenta é menos sensível a variações de turbidez da água bruta, característica especialmente vantajosa em mananciais superficiais sujeitos a flutuações sazonais.

A literatura nacional complementa essas evidências ao demonstrar a viabilidade do filtro lento de areia em programas de saneamento rural de baixo custo. Di Bernardo e Dantas (2017) apontam que essa técnica é capaz de atender às exigências da Portaria nº 888/2021 sem necessidade de adição de reagentes químicos, o que reduz os custos de operação e evita a geração de subprodutos potencialmente tóxicos. A Funasa (2015) e a Codevasf (2021) destacam que a tecnologia contribui para a redução de doenças de origem hídrica, como diarreias e hepatites, e para o fortalecimento da autonomia comunitária, visto que o sistema pode ser construído com materiais locais e operado por moradores capacitados. Essa dimensão social reforça o caráter multidisciplinar da segurança hídrica, articulando tecnologia, gestão e cidadania.

A OMS (World Health Organization, 2022) enfatiza que soluções como o filtro lento de areia em dupla camada desempenham papel estratégico para alcançar o ODS 6 da Agenda 2030, que prevê o acesso universal à água potável e ao saneamento seguro. Segundo o organismo, o sucesso dessas iniciativas depende da integração entre políticas públicas, educação sanitária e monitoramento contínuo da qualidade da água. Essa visão é compartilhada pela Un-Water (2013), que define a segurança hídrica como condição essencial à resiliência social e ambiental frente às mudanças climáticas e às crises de escassez. No contexto brasileiro, essa abordagem se alinha às diretrizes do Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e aos compromissos da PNRH, que enfatiza o uso racional, a participação comunitária e a valorização do conhecimento técnico local.

Ao se analisar o conjunto das evidências, observa-se que o filtro lento de areia em dupla camada combina eficiência técnica, sustentabilidade ambiental e relevância social, características que o tornam uma tecnologia apropriada às realidades do semiárido brasileiro. A simplicidade do sistema, associada ao desempenho comprovado na remoção de contaminantes, faz dele uma ferramenta fundamental para a mitigação dos riscos sanitários e o fortalecimento da segurança hídrica. Além disso, sua adoção representa um avanço no campo das tecnologias sociais, ao integrar aspectos técnicos e comunitários em um modelo de gestão descentralizada da água. Dessa forma, o filtro lento de areia não apenas melhora a qualidade da água, mas também contribui para a promoção da equidade, da saúde pública e da sustentabilidade – princípios basilares de uma sociedade comprometida com o uso responsável de seus recursos naturais.

MÉTODO

O presente estudo adota uma abordagem metodológica que combina a revisão de literatura científica com a análise de um estudo de caso desenvolvido no município de Jaguarari, Bahia, no distrito rural de Pilar, onde foi implementado um sistema de tratamento de água por filtro lento de areia em dupla camada. Essa escolha metodológica tem como base a necessidade de integrar conhecimento técnico e experiência empírica, permitindo compreender a aplicabilidade, a eficiência e as limitações da tecnologia sob condições reais de uso. A combinação entre revisão teórica e estudo de caso representa uma estratégia de

investigação consolidada nas ciências ambientais e de gestão de recursos hídricos, especialmente quando o objetivo é analisar tecnologias sociais e soluções descentralizadas (Bruyne; Herman; Schoutheete, 1997; Laville; Dionne, 1999; Oliveira, 2013).

A pesquisa caracteriza-se como de natureza qualitativa e descritiva, com elementos quantitativos complementares, uma vez que se fundamenta na análise de dados secundários oriundos de relatórios técnicos, artigos científicos e legislações, além de resultados obtidos em campo durante a execução do projeto. Essa abordagem mista possibilita uma visão mais abrangente sobre o tema, permitindo correlacionar aspectos técnicos, operacionais e sociais relacionados ao desempenho do filtro lento de areia em dupla camada (Barbosa, 2023). Segundo Yin (2015), o estudo de caso é indicado quando se busca compreender fenômenos complexos inseridos em seu contexto real, sendo particularmente útil na área de gestão ambiental e saneamento rural, em que fatores sociais e ambientais interagem de forma dinâmica.

A revisão de literatura seguiu um protocolo adaptado das metodologias de revisão narrativa e integrativa, orientado por etapas de busca, seleção e análise de publicações científicas. Foram consultadas bases de dados nacionais e internacionais, incluindo SciELO, ScienceDirect, Scopus, PubMed, SpringerLink e Google Scholar, com o objetivo de identificar pesquisas publicadas entre 2010 e 2025. Utilizaram-se descritores em português e inglês, como “filtro lento de areia”, “dupla camada”, “tratamento de água potável”, “tecnologia social”, “segurança hídrica”, “slow sand filtration” e “dual media filter”. Foram incluídos artigos revisados por pares, manuais técnicos, dissertações e relatórios oficiais de órgãos nacionais e internacionais, como a Funasa, a Codevasf, a Environmental Protection Agency (EPA) e a World Health Organization (WHO) (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Environmental Protection Agency, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2015; World Health Organization, 2022).

Para garantir a confiabilidade dos dados, adotaram-se critérios de inclusão e exclusão. Foram incluídos estudos que abordassem diretamente a aplicação, o desempenho ou a avaliação de sistemas de filtro lento de areia simples ou de dupla camada, bem como pesquisas relacionadas à segurança hídrica e à potabilidade da água em comunidades rurais. Foram excluídos trabalhos sem revisão científica, textos opinativos e materiais que não apresentassem dados técnicos mensuráveis. Cada estudo selecionado foi analisado quanto ao tipo de meio filtrante utilizado, taxa de filtração, qualidade da água bruta e tratada, periodicidade de limpeza, custos de implantação e conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021). Essa sistematização permitiu construir uma base comparativa entre resultados obtidos em diferentes contextos e regiões, identificando padrões de eficiência e fatores críticos de operação.

O estudo de caso foi desenvolvido como parte do projeto de pesquisa ProfÁgua (UFBA) e implementado no distrito de Pilar, município de Jaguarari, na região norte da Bahia. A escolha dessa localidade justifica-se pela representatividade de suas condições climáticas e socioeconômicas, típicas do semiárido nordestino, caracterizado por baixa pluviosidade, solos rasos e limitada disponibilidade hídrica (Instituto Nacional do Semiárido, 2021;

Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste, 2020). O projeto foi executado com a participação de técnicos da Codevasf, professores do programa e moradores da comunidade, configurando uma experiência de gestão compartilhada e de aprendizado coletivo. O sistema implantado consistiu em duas unidades de filtração lenta, compostas por caixas de alvenaria impermeabilizadas e camadas filtrantes de areia e antracito, conforme recomendações da literatura técnica (Baraee; Aryaee; Ghorbani; Samadi, 2016; Di Bernardo; Dantas, 2017; Huisman; Wood, 1974).

Os parâmetros avaliados incluíram turbidez, coliformes totais, coliformes termotolerantes, pH, ferro e manganês, monitorados antes e após o processo de filtração. As análises laboratoriais seguiram os métodos padrão descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association, 2017) e foram comparadas com os limites de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. O acompanhamento das condições de operação, incluindo taxa de filtração, tempo de maturação da camada biológica e frequência de raspagem da superfície, foi realizado semanalmente durante o período de seis meses, conforme o protocolo de operação recomendado pela Funasa (2006) e pela EPA (2021). Esses registros permitiram avaliar a estabilidade do desempenho do sistema e sua adequação às condições locais de uso.

Do ponto de vista analítico, os dados coletados foram submetidos à análise descritiva e interpretativa, buscando identificar relações entre variáveis técnicas e sociais. As informações obtidas foram organizadas em planilhas e comparadas com os resultados da literatura, a fim de verificar se o sistema implantado em Jaguarari apresentava desempenho equivalente ou superior ao documentado em outras regiões (Abdiyev; Liu; Zhang; Li; Jiang, 2023; Maiyo; Omondi; Muema, 2023). A análise qualitativa, por sua vez, contemplou a percepção dos moradores sobre o sistema, sua facilidade de operação e os benefícios percebidos na qualidade da água consumida. Essa dimensão participativa foi essencial para validar a tecnologia como instrumento de desenvolvimento local, em consonância com o conceito de tecnologia social defendido pela Fundação Banco do Brasil (2019) e pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) (2018), que valoriza o saber popular, o protagonismo comunitário e a sustentabilidade ambiental.

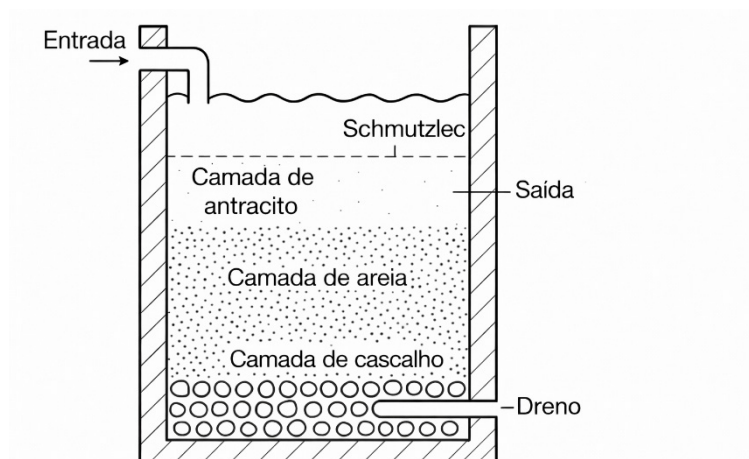
O rigor metodológico foi assegurado pela triangulação de fontes, conforme recomendado por Yin (2015), o que implicou cruzar informações provenientes de documentos técnicos, observações diretas e dados laboratoriais. Essa triangulação fortalece a validade interna do estudo e amplia sua credibilidade científica. Além disso, o trabalho respeitou todos os princípios éticos aplicáveis à pesquisa com comunidades, preservando a identidade dos participantes e obtendo consentimento livre e informado para a coleta de dados qualitativos. Os resultados apresentados não identificam indivíduos, mas sim evidenciam práticas e percepções coletivas relacionadas ao uso da tecnologia de filtração lenta. O caráter participativo da pesquisa também foi fundamental para o sucesso do projeto, uma vez que o envolvimento dos moradores na manutenção e no monitoramento do sistema assegura sua continuidade e sustentabilidade a longo prazo (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2015).

A metodologia adotada, portanto, articula três dimensões complementares: a científica, que garante o rigor teórico e técnico da pesquisa; a empírica, que permite avaliar a aplicabilidade prática da tecnologia; e a social, que reforça o papel do conhecimento comunitário na gestão descentralizada dos recursos hídricos. Essa integração reflete a natureza interdisciplinar do tema, situada entre a engenharia sanitária, a gestão ambiental e a sociologia da água. O uso de múltiplas fontes de dados e a aplicação de métodos mistos permitiram compreender de forma holística o impacto do filtro lento de areia em dupla camada, tanto na melhoria da qualidade da água quanto na promoção da segurança hídrica e da sustentabilidade local.

RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos no estudo de caso desenvolvido na comunidade rural de Pilar permite compreender de forma concreta a aplicabilidade e o desempenho do filtro lento de areia em dupla camada como tecnologia social voltada para o tratamento de água e a promoção da segurança hídrica. O sistema instalado foi construído com materiais locais e mão de obra comunitária, apresentando estrutura composta por camadas de antracito e areia apoiadas sobre leito de cascalho e drenos de PVC. Essa configuração foi projetada com base em recomendações técnicas de autores clássicos e contemporâneos, como Huisman e Wood (1974), Di Bernardo e Dantas (2017) e Abdiyev, Liu, Zhang, Li e Jiang (2023), que apontam a importância da seleção granulométrica adequada e da baixa taxa de filtração para garantir eficiência e estabilidade operacional.

Figura 1 – Esquema do filtro lento de areia em dupla camada



Fonte: adaptada de Fundação Nacional de Saúde (2015).

Durante os primeiros dias de funcionamento, observou-se um período de maturação da camada biológica superficial (*schmutzdecke*), que se formou gradualmente após cerca de sete dias de operação contínua. Essa etapa é fundamental, pois marca o estabelecimento de colônias bacterianas e microalgas responsáveis pela degradação da matéria

orgânica e pela inativação de microrganismos patogênicos. Conforme demonstrado por Fitriani, Abdullah, Rahman e Omar (2020), a formação da *schmutzdecke* é determinante para o desempenho do filtro, e seu amadurecimento adequado proporciona maior estabilidade ao sistema. Em Pilar, verificou-se que, após essa fase inicial, os valores de turbidez da água filtrada caíram progressivamente de 4,2 NTU para 0,6 NTU, atendendo plenamente ao limite máximo de 1,0 NTU estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021).

Os resultados laboratoriais indicaram também significativa redução da carga microbiológica. As análises comparativas entre a água bruta e a filtrada demonstraram redução de coliformes totais e termotolerantes acima de 99%, o que confirma a eficácia do sistema. Estudos similares realizados por Maiyo, Omondi e Muema (2023) e Haukelidsaeter, Braaten, Steinsvik e Ratnaweera (2023) relatam valores equivalentes, com remoções de até 4 logs para *Escherichia coli*, vírus entéricos e protozoários como *Giardia* e *Cryptosporidium*. Essa eficiência é explicada pela combinação de processos de adsorção, filtração e ação biológica na camada ativa, que promove tanto a retenção física de partículas quanto a decomposição de compostos orgânicos solúveis. No caso estudado, o sistema manteve desempenho estável ao longo de seis meses de operação, mesmo com pequenas variações na turbidez da água bruta, evidenciando a robustez e a resiliência da tecnologia.

Outro aspecto relevante identificado no estudo refere-se à remoção de metais pesados. As análises físico-químicas realizadas após a filtração apontaram reduções significativas nos teores de ferro (Fe) e manganês (Mn), com concentrações finais inferiores aos limites estabelecidos pela legislação brasileira. Resultados semelhantes foram observados por Baraee, Aryaee, Ghorbani e Samadi (2016) e Haukelidsaeter, Braaten, Steinsvik e Ratnaweera (2023), que confirmam a capacidade dos filtros lentos de dupla camada em reter metais dissolvidos, principalmente quando há presença de antracito ou carvão ativado na camada superior. O mecanismo de adsorção superficial e oxidação biológica contribui para a transformação dos metais em formas insolúveis, que permanecem retidas no leito filtrante. Tais evidências reforçam que o sistema, além de eficiente na remoção microbiológica, apresenta bom desempenho no controle de parâmetros inorgânicos críticos à potabilidade.

A operação contínua do filtro mostrou-se estável, com baixas perdas de carga e manutenção simples. Durante o período de acompanhamento, as raspagens superficiais foram realizadas apenas duas vezes, com intervalo de aproximadamente sessenta dias, sem necessidade de substituição da areia. Esse comportamento operacional confirma os achados de Di Bernardo e Dantas (2017), que destacam a longevidade e a baixa demanda de manutenção dos filtros lentos em comparação aos sistemas de filtração rápida. A baixa taxa de entupimento e a durabilidade da camada ativa são atribuídas à adequada distribuição hidráulica do fluxo, garantida pela dupla camada, e à eficiência da *schmutzdecke*, que atua como sistema de biofiltração autorregulado (Abdiyev; Liu; Zhang; Li; Jiang, 2023). O sistema manteve produção média de seiscentos litros de água tratada por hora, volume suficiente para suprir as necessidades domésticas de doze famílias locais.

Figura 2 – Construção comunitária do filtro na comunidade de Pilar



Fonte: arquivo do projeto ProfÁgua/UFBA (2023).

Além dos resultados técnicos, a experiência comunitária durante a construção do filtro se destacou como um dos elementos mais significativos do projeto. O processo de implantação foi conduzido de forma participativa, com a colaboração direta dos moradores na execução das etapas de escavação, alvenaria, preparação das camadas filtrantes e montagem dos drenos. A orientação técnica foi fornecida por profissionais do ProfÁgua/UFBA e da Codevasf, enquanto a mão de obra local foi responsável por todas as atividades práticas, fortalecendo o sentimento de pertencimento e valorização do saber comunitário. Essa abordagem colaborativa favoreceu o aprendizado coletivo, permitindo que os moradores compreendessem o funcionamento do sistema e adquirissem autonomia para sua manutenção futura.

Durante a fase de construção, foram realizados encontros comunitários para discutir o papel do filtro na melhoria da qualidade da água e na promoção da saúde pública. Esses encontros funcionaram também como momentos de educação ambiental, nos quais foram abordadas questões sobre o uso racional da água, limpeza dos reservatórios e monitoramento da turbidez. O envolvimento de mulheres e jovens da comunidade foi notável, ampliando o alcance social da iniciativa e consolidando o caráter inclusivo do projeto. Essa dimensão participativa reforça o conceito de tecnologia social defendido por Funasa (2015) e Unesco (2018), que reconhece a importância da integração entre conhecimento técnico e saber local na construção de soluções sustentáveis.

Além dos resultados técnicos, a experiência comunitária revelou impactos sociais e ambientais expressivos. Entrevistas realizadas com os moradores participantes apontaram percepções positivas quanto à qualidade e ao sabor da água, à facilidade de operação e à sensação de autonomia gerada pelo controle local do sistema. Essa dimensão participativa está em consonância com a concepção de tecnologia social, que valoriza o envolvimento das comunidades na gestão dos recursos e na manutenção das infraestruturas (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2015). Os relatos evidenciam também uma redução perceptível na ocorrência de doenças de veiculação hídrica, como diarreias e infecções gastrointestinais, após o início da utilização da água filtrada. Tais resultados corroboram os estudos da OMS (World Health Organization, 2022), que reconhecem a filtração lenta como tecnologia promotora de saúde pública e de segurança hídrica em países de baixa e média renda.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado permitiu demonstrar, de maneira consistente, que o filtro lento de areia em dupla camada representa uma solução tecnológica eficiente, sustentável e socialmente apropriada para o tratamento descentralizado de água em comunidades rurais. A pesquisa, desenvolvida por meio de revisão de literatura e estudo de caso aplicado, evidenciou que essa tecnologia social é capaz de atender plenamente aos parâmetros de potabilidade definidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, apresentando desempenho técnico elevado, simplicidade operacional e excelente custo-benefício. Ao longo da investigação, ficou evidente que o sucesso da implementação depende da integração entre o conhecimento técnico, a participação comunitária e o comprometimento com a gestão local dos recursos hídricos.

Os resultados do estudo de caso no distrito de Pilar mostraram que o sistema instalado obteve reduções expressivas de turbidez e coliformes, atingindo níveis compatíveis com os padrões internacionais de qualidade da água. A eficiência média superior a 99% na remoção microbiológica, aliada à redução significativa de metais como ferro e manganês, confirma que o filtro lento de areia em dupla camada não apenas proporciona água potável segura, mas também melhora as condições sanitárias da população atendida. Esses resultados corroboram a literatura científica, que tem destacado o papel dessa tecnologia como ferramenta estratégica para o fortalecimento da segurança hídrica em regiões de escassez (Abdiyev; Liu; Zhang; Li; Jiang, 2023; Maiyo; Omondi; Muema, 2023; World Health Organization, 2022).

Um dos aspectos mais relevantes observados foi o envolvimento direto da comunidade no processo de implantação e operação do sistema. Essa participação ativa promoveu o empoderamento local, a apropriação do conhecimento técnico e o fortalecimento dos laços sociais, fatores que asseguram a sustentabilidade do projeto a longo prazo. A experiência confirma a importância das tecnologias sociais como instrumentos de inclusão e desenvolvimento humano, reforçando a ideia de que a segurança hídrica não se limita ao acesso físico à água, mas envolve também a autonomia, a educação sanitária e a gestão participativa (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2015; Un-Water, 2013).

A filtração lenta de areia, em sua configuração de dupla camada, revelou-se especialmente adequada para as condições do semiárido nordestino, onde as limitações de infraestrutura e energia inviabilizam a adoção de sistemas convencionais de tratamento. Sua operação por gravidade, aliada à ausência de reagentes químicos e à facilidade de manutenção, reduz significativamente os custos operacionais e ambientais. Além disso, a utilização de materiais disponíveis localmente, como areia, cascalho e antracito, torna a tecnologia economicamente acessível e replicável em diferentes contextos, promovendo o uso racional dos recursos naturais e o fortalecimento da resiliência hídrica frente às mudanças climáticas (Di Bernardo; Dantas, 2017; Instituto Nacional do Semiárido, 2021; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2018).

Do ponto de vista científico, o trabalho contribui para consolidar o filtro lento de areia em dupla camada como alternativa comprovada e validada empiricamente para o cumprimento das metas do ODS 6 da Agenda 2030 da ONU, que busca garantir a disponibilidade e o manejo sustentável da água e do saneamento para todos. A tecnologia analisada alinha-se diretamente a essa meta, pois oferece uma solução de baixo custo e alto impacto, capaz de ser operada em escala local e de forma autônoma, sem comprometer a qualidade da água nem o equilíbrio ecológico. Além disso, ela reforça a integração entre ciência, política pública e cidadania, princípios basilares da governança moderna da água (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2018; World Health Organization, 2022).

Os dados obtidos também sugerem que a adoção de filtros lentos em programas públicos de saneamento rural pode contribuir de maneira efetiva para a redução de doenças de

veiculação hídrica, a ampliação do acesso a água potável e a promoção da equidade social. A replicabilidade do modelo é viável tanto técnica quanto financeiramente, sendo necessária, no entanto, a implementação de políticas públicas de apoio, capacitação técnica e acompanhamento contínuo por órgãos de vigilância sanitária e universidades. O fortalecimento de parcerias entre instituições acadêmicas, agências governamentais e comunidades locais é essencial para ampliar o alcance dessas iniciativas e garantir sua sustentabilidade ao longo do tempo (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2021; Environmental Protection Agency, 2021; Fundação Nacional de Saúde, 2015).

Pode-se concluir que o filtro lento de areia em dupla camada é mais do que uma tecnologia de tratamento de água: trata-se de uma ferramenta de transformação social, ambiental e educativa. Sua aplicação contribui para a construção de comunidades mais resilientes, autônomas e conscientes da importância da gestão sustentável dos recursos hídricos. Além de melhorar a qualidade da água, o sistema promove a integração entre saber científico e saber popular, gerando aprendizado coletivo e fortalecendo o senso de pertencimento e responsabilidade ambiental. Assim, a experiência de Pilar demonstra que é possível aliar ciência, simplicidade e eficiência para alcançar soluções sustentáveis que garantam a todos o direito fundamental à água potável.

O presente trabalho, ao reunir fundamentos técnicos, evidências empíricas e análises sociais, reafirma a necessidade de valorização das tecnologias sociais como eixo estratégico das políticas públicas de saneamento e segurança hídrica. Recomenda-se que futuras pesquisas explorem a durabilidade dos sistemas em diferentes condições climáticas, a eficiência de novos materiais filtrantes e o potencial de integração do filtro lento com outras etapas de tratamento, como desinfecção solar e reúso de águas residuais. Dessa forma, será possível ampliar o alcance e o impacto dessa tecnologia, consolidando-a como instrumento de equidade, sustentabilidade e saúde pública.

REFERÊNCIAS

Abdiyev, K., Liu, X., Zhang, Q., Li, M., & Jiang, T. (2023). Review of slow sand filtration for raw water treatment. *Water*, Hamilton, ON, v. 15, n. 2, p. 1-17. doi: 10.3390/w15020345

American Public Health Association. (2017). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association.

Baraee, I., Aryaee, M., Ghorbani, R., & Samadi, M. (2016). Biofiltration in GAC-sand/anthracite systems: TOC/color removal. *Journal of Water Process Engineering*, Amsterdam, NL, v. 13, p. 105-115.

Barbosa, S. H. A. O. (2023). **Tratamento de água por filtro lento de areia em dupla camada e segurança hídrica**. 2023. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.

- Brasil. (1997). Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF.
- Brasil. (2014). **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)**. Brasília, DF: Ministério das Cidades.
- Brasil. (2021). Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**: Seção 1, Brasília, DF.
- Bruyne, P., Herman, J., & Schoutheete, M. (1997). **Dinâmica da pesquisa em ciências sociais**. Lisboa, PT: Estampa.
- Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. (2021). **Relatório técnico de desempenho de filtros lentos de areia**. Brasília, DF: CODEVASF.
- Di Bernardo, L., & Dantas, A. D. B. (2017). **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos, SP: Rima.
- Environmental Protection Agency. (2021). **Water treatment manual: filtration**. Wexford, IE: Environmental Protection Agency.
- Environmental Protection Agency. (2024). **Water quality goals and slow sand filtration**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency.
- Fitriani, N., Abdullah, S. R. S., Rahman, A. N. A., & Omar, W. M. S. W. (2020). Behavior of schmutzdecke with varied filtration rates. **Heliyon**, London, UK, v. 6, n. 12, p. 5-23.
- Fitriani, N., Abdullah, S. R. S., Rahman, A. N. A., & Omar, W. M. S. W. (2023). Modified slow sand filters with alternative media. **Heliyon**, London, UK, v. 9, n. 3.
- Fundação Nacional de Saúde. (2015). **Manual de saneamento**. 4. ed. Brasília, DF: Fundação Nacional de Saúde.
- Fundação Nacional de Saúde. (2006). **Manual de saneamento**. 3. ed. Brasília, DF: Fundação Nacional de Saúde.
- Haukelidsaeter, S., Braaten, H. F. V., Steinsvik, A., & Ratnaweera, H. (2023). Influence of filter age on Fe, Mn and NH₄ removal in dual media filters. **Water Research**, Oxford, UK, v. 230.
- Huisman, L., & Wood, W. E. (1974). **Slow sand filtration**. Geneva, CH: World Health Organization.
- Instituto Nacional do Semiárido. (2021). **Relatório técnico sobre a gestão de água no semiárido brasileiro**. Campina Grande, PB: INSA.
- Laville, C., & Dionne, J. (1999). **A construção do saber**: manual de metodologia da pesquisa em ciências humanas. Porto Alegre, RS: Artmed.

Maiyo, J. K., Omondi, E. A., & Muema, F. (2023). Slow sand filters for the 21st century: a review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, CH, v. 15, n. 4, p. 1-15. doi: 10.3390/ijerph20021019

Oliveira, S. M. (2013). **Metodologia científica: fundamentos e técnicas**. São Paulo, SP: Atlas.

Organização das Nações Unidas (2015). **Agenda 2030**. Nova York, USA.

Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. (2020). **Relatório sobre a disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro**. Recife, PE: SUDENE.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2018). **Water and sustainable development report**. Paris, FR: UNESCO.

UN-Water. (2013). **Water security and the global water agenda**. Hamilton, ON: United Nations University.

U.S. Environmental Protection Agency. (1991). **Management Control Plan**. Washington, D.C.: National Service Center for Environmental Publications.

World Health Organization. (2022). **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Geneva, CH: World Health Organization.

Yin, R. (2015). **Case study research: design and methods**. 5. ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.