

FILTROS LENTOS DOMICILIARES PARA TRATAMENTO DE ÁGUA EM COMUNIDADES RURAIS: ESTUDO PILOTO EM ARATINGA/RS

Emely Negreiro Mlenek

Priscilla Both Silva

Suzana Frighetto Ferrarini

RESUMO: O acesso à água potável ainda é um desafio em muitas comunidades rurais brasileiras, onde a infraestrutura de saneamento é precária. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de filtros lentos em escala domiciliar, construídos com materiais locais e de baixo custo, como uma solução sustentável para o tratamento de água em comunidades isoladas. O desenvolvimento dos filtros envolveu a seleção, limpeza e preparação dos materiais filtrantes, utilizando recursos regionais. O sistema foi monitorado por 117 dias, inicialmente com água bruta fornecida pela companhia de saneamento e, posteriormente, com água da comunidade Aratinga, em São Francisco de Paula/RS. Foram analisados parâmetros como turbidez, pH e temperatura, além da caracterização microbiológica da camada *Schmutzdecke*, essencial para a eficiência do processo. Os resultados demonstraram alta eficiência na remoção de turbidez,

estabilidade do pH e resiliência do sistema a variações de temperatura. A análise microbiológica indicou uma *Schmutzdecke* bem adaptada ao meio filtrante, contribuindo para a remoção de contaminantes biológicos. Nas amostras de água da comunidade, observou-se a ausência de coliformes totais e *Escherichia coli*, confirmando a segurança microbiológica da água tratada. A aplicação do sistema em condições reais comprovou sua eficácia e viabilidade, destacando-o como uma alternativa sustentável e de fácil replicação para o tratamento de água em regiões com acesso limitado a tecnologias avançadas. Este estudo contribui para o desenvolvimento de soluções práticas, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com potencial para melhorar a qualidade de vida em comunidades rurais.

PALAVRAS-CHAVE: potabilidade da água; camada microbiológica; sustentabilidade hídrica; comunidades isoladas.

DOMICILAR SLOW FILTERS FOR WATER TREATMENT IN RURAL COMMUNITIES: PILOT STUDY IN ARATINGA/RS

ABSTRACT: Access to safe drinking water remains a challenge in many rural Brazilian communities, where sanitation infrastructure is inadequate. This study aimed to evaluate the efficiency of household-scale slow sand filters constructed using locally available and low-cost materials as a sustainable solution for water treatment in isolated communities. The filter development process involved the selection, cleaning, and preparation of filtration media, utilizing regional resources. The system was monitored for 117 days, initially using raw water supplied by the municipal sanitation company and later with water sourced from the Aratinga community in São Francisco de Paula, RS. Parameters such as turbidity, pH, and temperature were analyzed, along with microbiological characterization of the Schmutzdecke layer, which plays a key role in the filtration process. The results demonstrated high efficiency in turbidity removal, pH stability, and system resilience to temperature variations. Microbiological analysis indicated a well-established Schmutzdecke, contributing to the removal of biological contaminants. In water samples collected from the community, no total coliforms or Escherichia coli were detected, confirming the microbiological safety of the treated water. The implementation of the system under real conditions validated its effectiveness and feasibility, highlighting it as a sustainable and easily replicable alternative for water treatment in areas with limited access to advanced technologies. This study contributes to the development of practical solutions aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), with the potential to improve the quality of life in rural communities.

KEYWORDS: drinking water safety; biofilm layer; water sustainability; isolated communities.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para a vida e o desenvolvimento humano, mas sua distribuição equitativa e segura enfrenta desafios significativos, especialmente em localidades remotas ou em condições de vulnerabilidade. No Brasil, cerca de 35 milhões de pessoas não têm acesso à água tratada, enquanto mais de 100 milhões vivem sem coleta de esgoto, refletindo uma crise estrutural no saneamento básico (Brasil, 2021; Ana, 2023). Essa precariedade contrasta com as metas globais da Agenda 2030, que, por meio do ODS 6, visam garantir acesso universal e sustentável à água potável e ao saneamento (Unesco, 2024). A Organização Mundial da Saúde (OMS) destaca que até 50% dos casos de desnutrição em países em desenvolvimento estão relacionados à água contaminada, evidenciando o impacto direto da falta de acesso à água potável segura na saúde pública e na qualidade de vida de comunidades vulneráveis (Mwabi; Mamba; Momba, 2012).

Nas áreas rurais, a situação é ainda mais alarmante, com dependência de fontes não protegidas, como poços artesianos, poços escavados, popularmente conhecidos como cacimbas, que expõem populações a contaminantes como sedimentos, matéria orgânica e patógenos, elevando os riscos de doenças de transmissão hídrica e alimentar (DTHA). Situação que se agrava em função da distância e difícil acesso a postos de saúde para

atendimento (Klein et al. 2017; Ministério da Saúde, 2024). Estudos como os de Yamaguchi et al. (2013) indicam que surtos de DTDA são amplamente associados à ausência de infraestrutura adequada, onde a contaminação da água pode ocorrer tanto no ponto de origem quanto durante o armazenamento inadequado. Barros (2019) destaca que a contaminação microbiológica é uma das principais causas de doenças em comunidades rurais, evidenciando a necessidade de soluções acessíveis e eficazes.

A comunidade Aratinga, distrito de Tainhas, em São Francisco de Paula/RS, exemplifica essa realidade. Os moradores dependem de poços escavados sem proteção adequada, agravados pela proximidade de animais e ausência de sistemas de proteção (Bianchi et al., 2022). Nesse contexto, os filtros lentos destacam-se como solução promissora por sua simplicidade operacional, baixo custo e alta eficiência na remoção de partículas e patógenos, sendo amplamente recomendados por normas técnicas como a NBR 12216:1992. Globalmente, os filtros lentos são amplamente recomendados para o fornecimento de água potável segura em comunidades rurais não atendidas por sistemas centralizados, especialmente em países em desenvolvimento, onde seu baixo custo e simplicidade operacional são fatores críticos para adoção (Maiyo et al. 2023; Abdiyev et al. 2023). Contudo, a implementação dessas tecnologias enfrenta desafios técnicos, como a adequação às características específicas da água local, e sociais, incluindo limitações culturais, educação comunitária e necessidade de treinamento para operação e manutenção, fundamentais para garantir sua sustentabilidade (Mwabi, Mamba e Momba, 2012).

Estudos prévios, como os de Freitas (2017) e Maciel (2018), demonstraram a viabilidade técnica e econômica de filtros lentos utilizando materiais locais, como areia, brita e pedregulho, adaptados a condições específicas. Esses sistemas apresentam benefícios adicionais, como a formação da camada biológica (*Schmutzdecke*), que contribui para a retenção microbiológica (Lima, 2020; Murtha, 1998). Globalmente, tecnologias acessíveis como essas são recomendadas por organizações internacionais, como a UNESCO, para garantir acesso seguro à água em comunidades vulneráveis.

O presente estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema de filtração domiciliar baseado em filtros lentos, utilizando materiais de baixo custo e adaptados às condições específicas da comunidade Aratinga. Durante 117 dias de monitoramento, foram avaliados parâmetros físico-químicos, como turbidez, pH e temperatura, e microbiológicos, incluindo a presença de coliformes totais e *Escherichia coli*, além da caracterização da camada biológica (*Schmutzdecke*), visando validar a eficiência do sistema e sua potencial replicabilidade em outras comunidades rurais com infraestrutura de saneamento limitada.

METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento deste trabalho combinam pesquisa experimental e descritiva, conforme caracterizado por Gil (2010) e Lakatos e Marconi (2010). A pesquisa experimental foi aplicada nas etapas de seleção, limpeza e montagem dos filtros lentos, bem como no monitoramento de parâmetros indicadores de potabilidade, avaliando a eficiência do sistema no tratamento de água para consumo humano. Já a pesquisa descritiva foi utilizada para analisar a situação enfrentada pela comunidade estudada, contextualizando o estado da arte sobre filtração lenta em comunidades rurais a partir da literatura especializada e dos desafios específicos identificados no local.

A pesquisa teve como ponto de partida a situação enfrentada por uma comunidade rural localizada no interior do município de São Francisco de Paula/RS, em relação à má qualidade da água consumida pelos moradores. Desde 2021, a qualidade da água tem sido monitorada. Algumas residências foram equipadas com sistemas de cloração, que, embora tenham contribuído para a desinfecção, não asseguram a conformidade de parâmetros como turbidez e cor, conforme exigido pela legislação de potabilidade vigente (GM/MS n° 888/21).

Seleção e Preparação dos Materiais Filtrantes e Suportes

Os materiais utilizados incluíram areia fina, areia média, areia grossa, britas 0, 1 e 2 e pedregulho. Estes foram obtidos de fontes locais como a região de Taquara/RS e São Francisco de Paula/RS, e submetidos a um processo rigoroso de limpeza, secagem e controle granulométrico (NBR 11799/2016).

Os materiais de suporte foram lavados com água limpa para remoção de sujeiras superficiais e imersos em solução de hipoclorito de sódio a 1% por 48 horas para descontaminação (Figura 1). Após esse período, foram enxaguados em água corrente para remover resíduos químicos, secos ao sol por sete dias e armazenados em sacos fechados para prevenir contaminação secundária (Lima, 2020; Freitas, 2017).

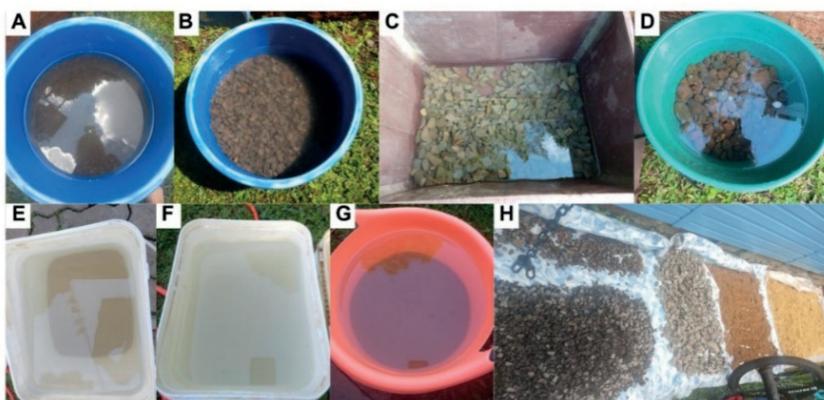


Figura 1 - Processo de lavagem e secagem dos materiais utilizados para a confecção dos filtros. Onde:
A: Brita 0; B: Brita 1; C: Brita 2; D: Pedregulho/Pedra de rio; E: Areia fina; F: Areia média; G: Areia grossa; H: Secagem da brita 1, brita 2, areia grossa e areia fina.

Fonte: Autora, 2024.

Os materiais filtrantes areia grossa, media e fina foram peneirados utilizando peneiras granulométricas ($250\text{ }\mu\text{m}$, $500\text{ }\mu\text{m}$ e $1000\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente) para assegurar a uniformidade, enquanto os de granulometria maior foram medidos com paquímetro e moldes de papelão. As granulometrias utilizadas identificadas para esses materiais foram: brita 1 17,75 mm, brita 2 41,5 mm e cascalho/pedra de rio 22 mm (Figura 2).

A turbidez da água de lavagem foi monitorada até atingir ≤ 15 NTU, conforme recomendado por Freitas (2017).

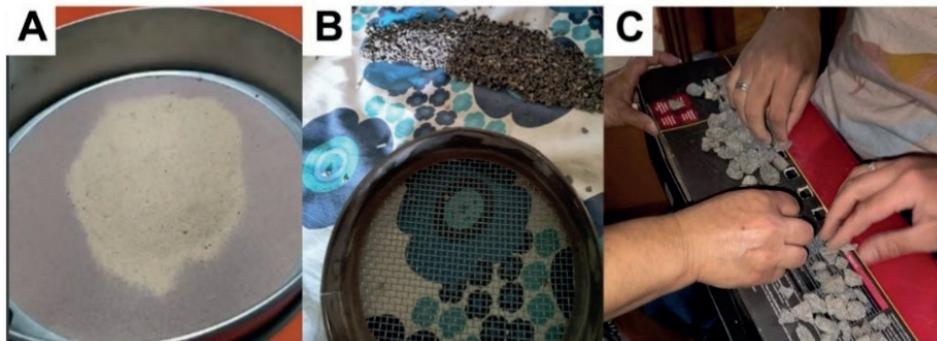


Figura 2 – Processos de peneiramento e medição granulométrica dos materiais filtrantes e suporte.
Onde: A - Areia fina; B - Brita zero; C - Brita 1.

Fonte: Autora, 2024.

Configuração dos filtros lentos

O sistema foi configurado em bombonas de polietileno de 20 litros, dispostas em série, com fluxo descendente, seguindo as diretrizes da NBR 12216:1992 (Figura 3).



Figura 3 - Configuração do sistema de filtração utilizado neste estudo.

Fonte: Autora, 2024.

Dois filtros foram montados com diferentes arranjos de camadas filtrantes para análise comparativa (Tabela 1). O Filtro 1 foi composto por camadas de areia média e grossa, seguidas por brita 1 e brita 2. Já o Filtro 2 apresentou uma configuração distinta, com uma camada de areia fina, seguida por brita zero e pedregulho. Essa distinção nas camadas visa avaliar a eficácia dos diferentes arranjos na remoção de partículas e no desempenho global do sistema (NBR 11799/2016; Dos Santos et al. 2023).

Para manutenção, cada filtro foi equipado com um sistema de retrolavagem, conforme práticas sugeridas por Baldez (2023) e Freitas (2017), que destacam a importância desse recurso para garantir a longevidade dos sistemas.

F1		F2	
Tipo de material	Espessura (cm)	Tipo de material	Espessura (cm)
Água bruta	7	Água bruta	7
Material filtrante		Material Filtrante	
Areia fina		Material filtrante	
Areia média	15	Areia fina	20
Areia grossa	5	Areia média	-
Areia grossa		-	
Material suporte		Material suporte	
Brita 0	-	Brita 0	8,5
Brita 1	8,5	Brita 1	-
Brita 2	8,5	Brita 2	-
Pedregulho	-	Pedregulho	8,5

Tabela 1 – Disposição das camadas de materiais suportes e filtrantes empregadas nos Filtros 1 (F1) e 2 (F2).

Fonte: Autora, 2024.

Procedimentos de Limpeza e Descontaminação dos Materiais e Filtros

Todos os componentes do sistema foram submetidos a descontaminação com solução de hipoclorito de sódio a 1% por 48 horas antes da montagem. Após a configuração (montagem dos filtros), foi aplicada uma solução de cloro a 25 mg/L por 12 horas para garantir a eliminação de possíveis contaminantes.

Esses procedimentos são fundamentais para assegurar a funcionalidade do sistema e evitar contaminações cruzadas durante a operação (Klein et al. 2017).

Monitoramento dos Parâmetros de Qualidade da Água

Os parâmetros turbidez, pH, temperatura, coliformes totais e *Escherichia coli* foram monitorados ao longo de 117 dias em três pontos: água bruta, água após passagem pelo F1 e água após passagem pelo F2. A frequência de monitoramento variou de três a cinco vezes por semana, utilizando equipamentos calibrados conforme especificações técnicas.

O monitoramento visou avaliar a eficiência do sistema em alcançar os padrões de qualidade exigidos para consumo humano (GM/MS nº 888, (2021); Murtha, 1998; Freitas, 2017).

Avaliação da Camada Biológica

A *Schmutzdecke* formada na superfície dos materiais filtrantes (Figura 4) foi avaliada no 85º dia de operação. Amostras foram coletadas por raspagem e transferidas para frascos de 1 litro com 300 mL da mesma água dos filtros, garantindo oxigenação adequada até o transporte ao laboratório (Huisman; Wood, 1974; Klein et al. 2017).

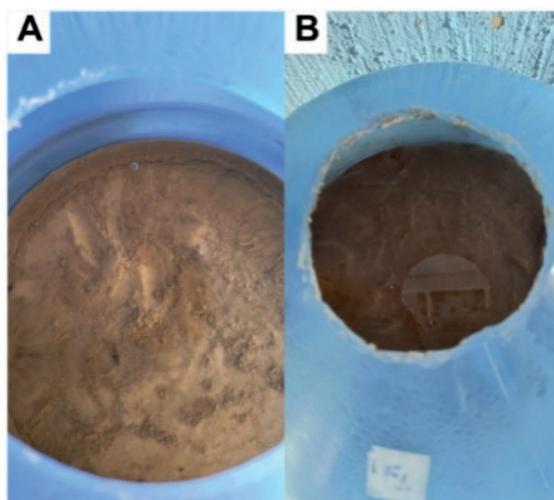


Figura 4 - Camada biológica (*Schmutzdecke*) no 85º dia de operação dos F1 e do F2. Onde: A - Camada do filtro 1; B - Camada do filtro 2.

Fonte: Autora, 2024.

A estrutura da camada foi avaliada qualitativamente por meio de microscopia de lodos ativados em um laboratório contratado, especializado nesse tipo de análise. A avaliação concentrou-se na identificação de microrganismos como nematódeos, tecamebas, ciliados e heliozoários, amplamente descritos na literatura (Freitas, 2017; Murtha, 1998). Raspagens adicionais foram realizadas ao longo dos 117 dias de operação para a manutenção do sistema (Klein et al., 2017); no entanto, essas amostras não foram enviadas para análise laboratorial.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo são apresentados em seis etapas principais, abrangendo desde a preparação inicial dos materiais filtrantes até a avaliação do desempenho do sistema em diferentes condições iniciais. A primeira etapa descreve o processo de lavagem e preparo dos materiais filtrantes, etapa relevante para garantir a eficiência do sistema. Subsequentemente, são apresentados os resultados do monitoramento dos parâmetros turbidez, pH e temperatura, que refletem a qualidade da água tratada em diferentes etapas nos filtros F1 e F2 ao longo dos 117 dias de monitoramento, utilizando água bruta fornecida pela companhia de saneamento municipal. Em sequência, destaca-se a avaliação microbiológica da camada biológica (*Schmutzdecke*), fundamental para a eficiência microbiológica dos filtros lentos. Por fim, com o sistema otimizado, foi realizada uma análise utilizando água bruta coletada na comunidade Aratinga, representando uma aplicação prática deste estudo piloto. Essa última etapa buscou avaliar a eficiência do sistema em condições similares às enfrentadas pelas comunidades rurais que poderão ser beneficiadas por essa tecnologia.

Lavagem dos Materiais Filtrantes

A Figura 5 apresenta o monitoramento da turbidez durante as lavagens dos materiais filtrantes (areia fina, média e grossa), evidenciando o comportamento distinto de cada material ao longo do processo. A areia fina exibiu os valores iniciais mais elevados de turbidez, ultrapassando 1000 UHT, e necessitou de 14 lavagens para atingir níveis inferiores a 15 UHT. Este comportamento é atribuído à maior aderência de partículas finas às superfícies granuladas, dificultando sua remoção inicial. Similarmente, a areia média também necessitou de 14 lavagens para alcançar o mesmo padrão, embora tenha apresentado valores iniciais de turbidez mais baixos. Já a areia grossa destacou-se pela eficiência no processo de limpeza, atingindo níveis aceitáveis de turbidez em apenas seis lavagens, resultado que reflete a menor retenção de partículas em grãos maiores, favorecendo a sedimentação e o escoamento de partículas soltas.

Nos ciclos iniciais de lavagem, observou-se uma redução acentuada nos valores de turbidez para todos os materiais. Após a quinta lavagem, a turbidez da areia grossa estabilizou-se em níveis baixos, enquanto as areias fina e média continuaram apresentando pequenas flutuações até a última lavagem. Esses resultados indicam a necessidade de procedimentos de limpeza mais rigorosos para materiais de granulometria fina, garantindo que os valores de turbidez atendam aos níveis recomendados (<15 UHT) antes de seu uso em filtros lentos. Tal conformidade é fundamental para evitar interferências no desempenho do sistema de filtração, como acúmulo de partículas indesejadas (NBR 11799/2016).

O comportamento observado neste estudo está de acordo com Freitas (2017), que evidenciou a relação direta entre a granulometria, a área superficial e a eficiência do processo de limpeza de materiais filtrantes. A metodologia aplicada demonstrou-se eficaz e replicável, assegurando a preparação adequada dos materiais para o uso no sistema de filtros lentos.

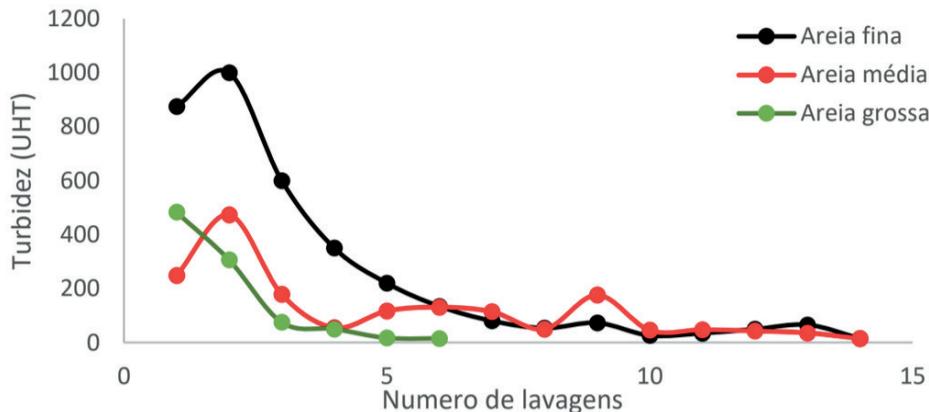


Figura 5 – Monitoramento da turbidez durante o processo de lavagem dos materiais filtrantes.

Fonte: Autora, 2024.

Monitoramento de Indicadores de Potabilidade

Turbidez

O sistema de filtros lentos em série demonstrou boa eficiência na redução da turbidez, com uma diminuição significativa nos valores observados entre a água bruta e a água tratada pelos filtros F1 e F2 ao longo do período de monitoramento. Os resultados, apresentados na Figura 6, mostram que, de maneira geral, os níveis de turbidez foram mantidos baixos, com exceção de dois picos: no 20º e no 90º dia. O maior pico, registrado no F2 no 90º dia e, pode estar associado à primeira raspagem realizada nos filtros. Esse procedimento, que envolve a remoção da camada superficial da *Schmutzdecke*, restabelece o fluxo de água ao resolver problemas de entupimento causados pelo espessamento natural da camada biológica. Entretanto, a raspagem pode levar à movimentação dos materiais filtrantes, reduzindo temporariamente a eficiência da camada biológica até que esta se regenere. Já o pico observado no 20º dia não teve justificativa operacional identificada, mas a variação pode estar relacionada à composição do filtro, uma vez que o F2 utiliza exclusivamente areia fina, material mais suscetível a movimentações.

Adicionalmente, problemas operacionais foram frequentes no F2 devido a entupimentos nas conexões de saída, exigindo manutenções regulares para restabelecer seu funcionamento. Esses problemas culminaram na interrupção definitiva do funcionamento do F2 no 93º dia. A partir desse momento, apenas o F1 foi monitorado até o término do

estudo. Essa recorrência de problemas no F2 impactou diretamente a manutenção de baixos níveis de turbidez em comparação com o F1, que apresentou desempenho mais consistente ao longo do período.

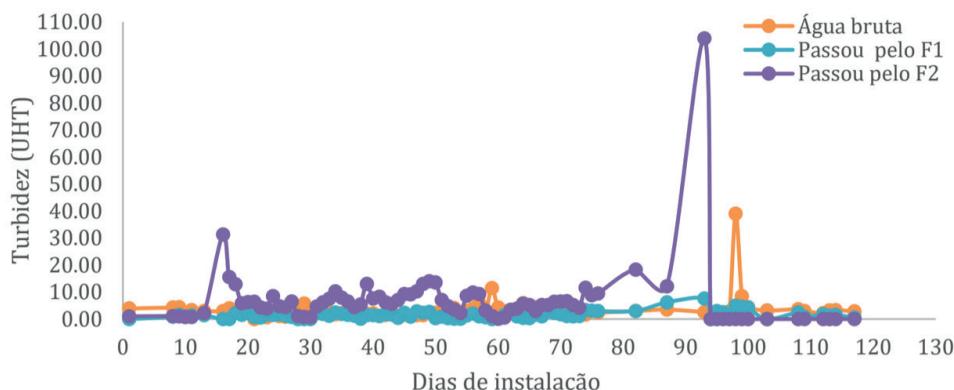


Figura 6 - Variação da turbidez nos filtros F1 e F2 ao longo dos 117 dias de monitoramento.

Fonte: Autora, 2024

Conforme descrito por Lima (2020), a camada biológica (*Schmutzdecke*) desempenha um papel essencial no controle da turbidez, atuando como uma barreira viva que retém e decompõe partículas em suspensão. Murtha (1998) complementa que o desempenho dessa camada depende de condições operacionais estáveis, como fluxo contínuo e manutenções regulares. Freitas (2017) também enfatiza que fatores como granulometria dos materiais filtrantes e composição da *Schmutzdecke* têm impacto direto na eficiência da filtração e na estabilidade dos níveis de turbidez.

A configuração do sistema neste estudo seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 12216:1992, que recomenda uma taxa de filtração máxima de 6 m³/m²/dia, garantindo o desempenho do sistema e prolongando sua vida útil. A norma também destaca a importância da uniformidade granulométrica e da profundidade adequada do meio filtrante, ambos considerados na configuração dos filtros utilizados. Pizzolatti (2010) reforça a relevância de práticas como retrolavagem periódica para evitar colmatação e manter a eficiência dos filtros.

Os resultados encontrados corroboram com os relatados por Da Silva et al. (2018), que observaram reduções de turbidez a níveis indetectáveis em sistemas similares aplicados em comunidades rurais, mesmo com valores iniciais baixos (< 1,0 uT). Maciel (2018) destaca a importância da operação em fluxo contínuo para estabilizar os níveis de turbidez, recomendando essa abordagem para maximizar a eficiência de filtros lentos.

Em relação ao monitoramento da turbidez, este estudo reforça que, com manutenção adequada e monitoramento contínuo, filtros lentos em série podem ser uma solução sustentável e de baixo custo para a melhoria da qualidade da água em comunidades rurais. O desempenho consistente do sistema, especialmente no F1, destaca sua viabilidade como alternativa segura para regiões com acesso limitado a infraestrutura de saneamento.

Potencial Hidrogeniônico - pH

O monitoramento do pH da água visou avaliar a estabilidade do parâmetro e sua adequação aos padrões de potabilidade. Nos primeiros 20 dias de monitoramento, observou-se uma elevação inicial nos níveis, atribuída ao processo de estabilização da camada biológica (*Schmutzdecke*). Após esse período, os valores estabilizaram-se entre 6,5 e 8,0, mantendo-se próximos aos valores da água bruta e dentro dos limites estabelecidos para consumo humano. Esse comportamento reflete a capacidade do sistema em manter a estabilidade química da água tratada sem a necessidade de intervenções químicas adicionais. A Figura 7 ilustra essa variação destacando a consistência entre os valores obtidos nos dois filtros.

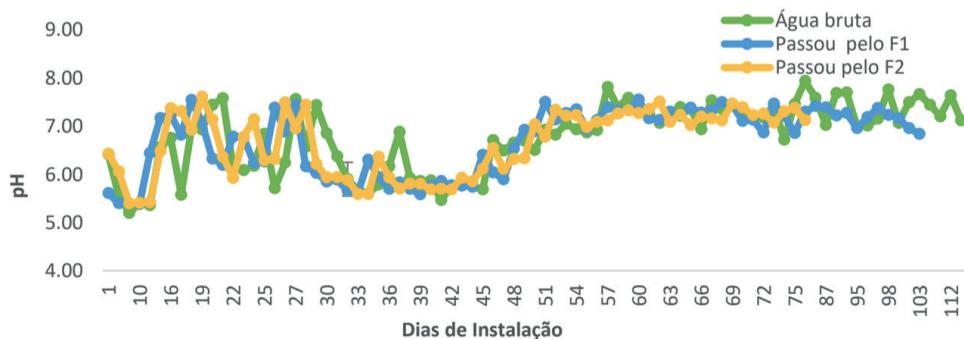


Figura 7 - Variação do pH nos filtros F1 e F2 ao longo dos 117 dias de monitoramento.

Fonte: Autora, 2024.

Conforme Lima (2020), filtros lentos apresentam estabilidade no pH devido à combinação dos processos biológicos e físicos, que favorecem a neutralidade e minimizam alterações indesejadas. Esse comportamento é corroborado por Murtha (1998), que relatou variações médias inferiores a 0,5 unidades de pH em sistemas de filtração lenta, mesmo durante períodos prolongados de operação. Essa estabilidade é importante para garantir a qualidade da água dentro dos limites de potabilidade entre 6,0 a 9,5, além de preservar sua composição natural.

A estabilidade do pH também é considerada uma vantagem operacional significativa. Maciel (2018) aponta que filtros lentos eliminam a necessidade de correções químicas frequentes, simplificando a operação e reduzindo custos. Freitas (2017) complementa que a manutenção de um pH neutro ou levemente alcalino contribui para a qualidade da água ao longo do processo de tratamento, além de minimizar riscos de corrosão e sedimentação em sistemas de distribuição subsequentes.

A NBR 12216:1992 reforça a importância de manter as características naturais da água durante o tratamento, garantindo a eficiência e a sustentabilidade do processo. Baldez (2023) destaca que a estabilidade do pH também é fundamental para a formação e manutenção da camada biológica (*Schmutzdecke*), associado a eficiência microbiológica dos filtros. Esse aspecto é particularmente relevante em comunidades rurais, onde o acesso a reagentes químicos para ajustes de pH é limitado.

Adicionalmente, pequenas variações podem ser influenciadas pela composição mineral da água bruta e pelos materiais filtrantes. Murtha (1998) observou que, nos primeiros dias de operação, a lixiviação de minerais de materiais naturais, como areia e pedregulho, pode causar alterações no pH. Esse efeito, no entanto, diminui gradualmente com o amadurecimento do sistema, como também foi observado neste estudo.

Com base nos resultados apresentados, o sistema de filtros lentos demonstrou alta eficiência em manter a estabilidade do pH, com pequenas flutuações que não comprometeram a qualidade da água tratada. Essa característica reforça sua relevância para comunidades rurais, onde a estabilidade do pH contribui para a segurança do abastecimento de água e elimina a necessidade de aditivos químicos. A integração das diretrizes da NBR 12216:1992 com adaptações locais, evidencia a viabilidade técnica e econômica do sistema como solução sustentável para o tratamento de água em áreas de recursos limitados.

Temperatura

A temperatura da água foi monitorada para avaliar sua estabilidade e possíveis variações ao longo do tempo (Figura 8). Os resultados demonstraram uma oscilação significativa, com valores variando entre 7 °C e 25 °C, refletindo as mudanças nas condições ambientais, já que o sistema foi operado em ambiente aberto e parcialmente exposto. Durante o período, observou-se uma tendência de flutuações regulares, com picos e quedas diretamente influenciados pelo clima local, evidenciando a interação entre fatores ambientais e a operação do sistema.

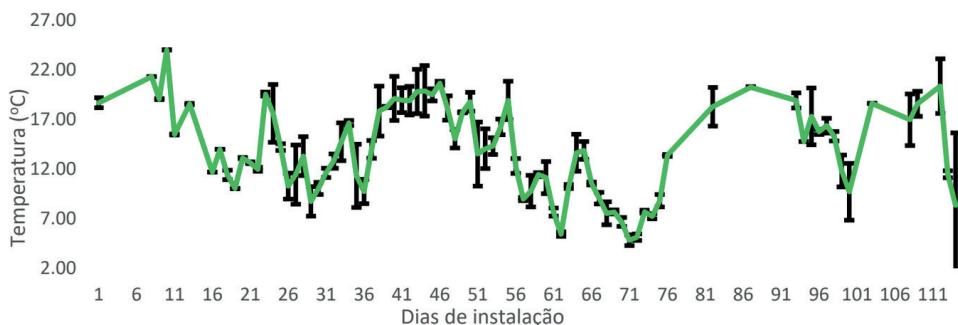


Figura 8 – Variação da temperatura no sistema de filtração nos 117 dias de monitoramento.

Fonte: Autora, 2024.

Conforme Lima (2020), a temperatura da água desempenha importante papel no desempenho dos filtros lentos, influenciando diretamente a atividade biológica da camada *Schmutzdecke*. Temperaturas mais elevadas tendem a acelerar os processos biológicos, promovendo maior eficiência na retenção de partículas e microrganismos. Em contrapartida, temperaturas mais baixas podem reduzir temporariamente a atividade

microbiológica, impactando a eficiência do sistema na remoção de contaminantes. Freitas (2017) complementa que, em climas temperados, como o da região onde este estudo foi desenvolvido, o controle da temperatura não é geralmente um fator crítico, pois as oscilações térmicas típicas permanecem dentro de uma faixa operacional tolerável.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que o sistema apresentou resiliência às variações térmicas, com a temperatura permanecendo dentro do intervalo adequado para a maioria dos microrganismos presentes na *Schmutzdecke*, conforme destacado por Baldez (2023). A faixa térmica observada, entre 7 °C e 25 °C, está em conformidade com as condições consideradas favoráveis por Murtha (1998) e Freitas (2017), que indicam que os microrganismos dessa camada conseguem ajustar seu metabolismo de maneira eficiente às condições térmicas nessa faixa, mantendo a eficiência microbiológica do sistema.

No entanto, medidas adicionais, como o sombreamento ou o isolamento parcial do sistema, poderiam ser implementadas para mitigar os efeitos de variações térmicas mais extremas, conforme recomendam Maciel (2018) e Baldez (2023). Tais estratégias podem ser especialmente importantes em regiões com grande amplitude térmica, promovendo maior robustez e estabilidade operacional.

Os achados deste estudo corroboram os resultados reportados por Da Silva et al. (2018), que observaram manutenção da eficiência de filtros lentos em zonas rurais com condições térmicas similares. Além disso, as diretrizes da NBR 12216:1992 destacam que o planejamento de sistemas de filtração deve levar em conta as condições climáticas locais, a fim de garantir a eficiência e a estabilidade do sistema.

Em conclusão, as variações térmicas observadas neste estudo não comprometeram a eficiência do sistema de filtração. Esses resultados destacam a robustez dos filtros lentos em condições climáticas moderadas, reforçando sua aplicabilidade em comunidades rurais que enfrentam variações térmicas dentro da faixa tolerável para os microrganismos da *Schmutzdecke*. Tal desempenho confirma a estabilidade e a eficácia do sistema no tratamento de água em contextos ambientais diversificados.

*Camada Microbiológica (*Schmutzdecke*)*

A camada microbiológica, ou *Schmutzdecke*, desempenha um papel relevante no desempenho de filtros lentos, funcionando como uma barreira viva capaz de reter partículas, decompor matéria orgânica e eliminar microrganismos patogênicos. Formada na superfície dos materiais filtrantes, essa camada biológica é de grande relevância para a eficiência microbiológica do sistema (Murtha (1998); Freitas (2017)).

Neste estudo, amostras da *Schmutzdecke* foram coletadas dos filtros F1 e F2 no 85º dia de operação e analisadas em laboratório externo. Conforme descrito na metodologia, a coleta foi realizada por raspagem da camada superficial, preservando a integridade da microbiota. A análise microbiológica concentrou-se na identificação qualitativa de microrganismos comumente encontrados em sistemas de filtração lenta, como nematódeos, tecamebas, ciliados e heliozoários (Murtha, 1998; Klein et al., 2017). Os resultados estão apresentados na Figura 9.

No Filtro 1 (Figuras 9A e 9B), os flocos apresentaram uma estrutura fragmentada, com pontos arredondados e compactos conectados por filamentos estruturais. A microbiota era composta majoritariamente por ciliados livres e flagelados, além de algas e cianobactérias. Foram identificados, por gota de amostra ($20 \mu\text{L}$), 18 flagelados, 37 ciliados livres, 7 ciliados reptantes, 15 rotíferos e 4 metazoários.

Por sua vez, o Filtro 2 (Figuras 9C e 9D) apresentou maior densidade microbiológica, indicando uma camada biológica mais consolidada. Foram registrados 458 flagelados, 106 ciliados livres e 15 rotíferos, além de algas e cianobactérias. Essa maior densidade sugere um elevado potencial para retenção de partículas e microrganismos patogênicos. Contudo, o Filtro 2 enfrentou problemas operacionais, como entupimentos frequentes, que exigiram manutenções regulares e impactaram sua funcionalidade. A retralavagem e raspagens controladas, realizadas de forma sistemática, foram essenciais para manter a eficiência e funcionalidade da *Schmutzdecke* ao longo do estudo, conforme recomendado por Baldez (2023).

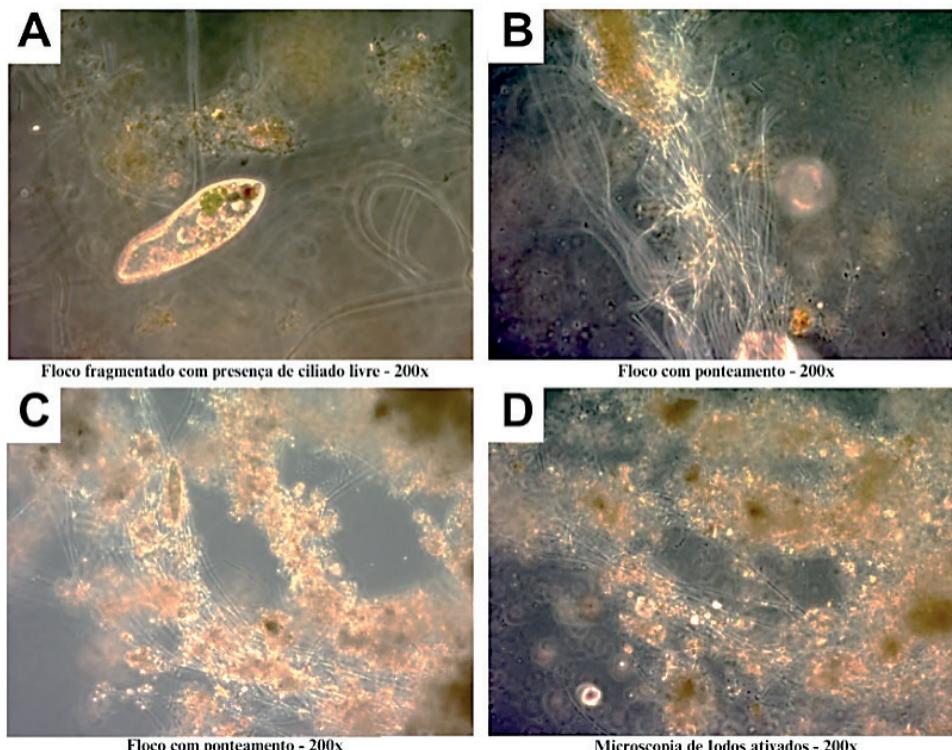


Figura 9 - Camada microbiológica (*Schmutzdecke*) dos filtros obtidas por microscopia de lodos ativados. Onde: A - Floco fragmentado com ciliado livre no filtro 1 (200x); B - Floco com ponteamento no filtro 1 (200x); C - Floco com ponteamento no filtro 2 (200x); D – Microscopia de lodos ativados filtro 2 (200x).

Fonte: Relatório de análise microbiológica: microscopia de lodos ativados, relatórios 4178.2024_Ef_1_1 e 4179.2024_Ef_2_1 Rev_1.

Os resultados obtidos com a caracterização da *Schmutzdecke* evidenciaram sua capacidade de adaptação às condições operacionais e ambientais. Além disso, reforçaram que práticas operacionais adequadas, como a retrolavagem e o monitoramento contínuo, são indispensáveis para garantir a eficiência dos sistemas de filtração, preservar a funcionalidade da camada biológica e assegurar a continuidade do fluxo durante a filtração (De Souza et al. 2022). Esses achados ressaltam o potencial dos filtros lentos como soluções sustentáveis para o tratamento de água em comunidades rurais.

Monitoramento da Água Bruta – Comunidade Aratinga

Os resultados dos parâmetros turbidez, pH e temperatura da água bruta proveniente da comunidade Aratinga, monitorados em sete dias distintos após a passagem pelo filtro lento F1 (Tabela 2), apresentaram comportamentos consistentes e alinhados com os dados previamente obtidos utilizando água da companhia de saneamento municipal.

Dia	Turbidez (UHT)		pH		Temperatura (°C)
	Água bruta	Água filtrada	Água bruta	Água filtrada	Água
1	3,24	2,16	5,32	6,74	14,90
DSP ^a	0,06	0,04	0,02	0,01	2,33
2	6,31	1,12	6,14	6,70	14,97
DSP	0,71	0,03	0,01	0,01	0,95
3	2,42	1,45	6,29	6,56	12,23
DSP	0,04	0,02	0,01	0,02	3,20
4	3,82	1,11	6,37	6,64	15,60
DSP	0,19	0,01	0,02	0,01	0,72
5	3,73	0,64	6,06	6,12	22,80
DSP	0,54	0,04	0,02	0,02	1,39
6	3,38	0,56	6,24	6,12	23,67
DSP	0,51	0,02	0,01	0,01	0,58
7	3,06	0,35	6,39	6,29	24,60
DSP	0,60	0,01	0,02	0,01	1,56

Tabela 2 – Resultados do monitoramento dos parâmetros turbidez, pH e temperatura na água bruta oriunda da comunidade Aratinga, após passagem pelo F1.

^aDSP – Desvio Padrão. Fonte: Autora, 2024.

Para o parâmetro turbidez, a água filtrada apresentou valores médios baixos, variando de 2,16 UHT no primeiro dia a 0,35 UHT no sétimo dia. Essas reduções foram notáveis em relação à água bruta, cujas médias variaram entre 3,24 UHT e 6,31 UHT. A eficiência do F1 na remoção de turbidez foi evidente, mesmo com valores iniciais mais elevados, demonstrando um desempenho consistente e confiável em diferentes condições da água bruta.

O parâmetro pH manteve-se estável ao longo do processo de filtração. Os valores médios da água filtrada variaram entre 6,12 e 6,74, permanecendo dentro dos limites recomendados para potabilidade. A água bruta apresentou uma leve variação, com médias entre 5,32 e 6,39, evidenciando que o sistema não alterou quimicamente a composição da água, garantindo sua segurança e adequação para consumo.

Quanto à temperatura, os valores médios da água filtrada oscilaram entre 14,90 °C e 24,60 °C, refletindo as variações naturais observadas na água bruta (com médias similares). Essas flutuações foram determinadas pelas condições climáticas locais, mas não comprometeram o desempenho do sistema, que demonstrou resiliência às mudanças ambientais. Esses resultados reforçam a adaptabilidade e eficiência do F1 no tratamento da água bruta oriunda da comunidade Aratinga.

Durante o monitoramento microbiológico realizado no 1º e no 7º dia, não foi detectada a presença de coliformes totais ou *Escherichia coli*, confirmando a eficiência microbiológica do sistema. Essa ausência de microrganismos patogênicos destaca a capacidade do F1 de proporcionar uma água segura para consumo humano.

A consistência nos resultados obtidos demonstra que o sistema é uma solução robusta e aplicável em condições reais, especialmente em localidades rurais que enfrentam desafios de acesso à água tratada. Além disso, a capacidade do filtro de operar eficientemente com água bruta de diferentes origens reforça sua potencialidade como uma alternativa viável para o tratamento em comunidades isoladas.

Filtração Lenta – Estado da Arte

A Tabela 3 apresenta uma revisão sobre o uso da filtração lenta em periódicos internacionais, com base em estudos encontrados por meio das palavras-chave em inglês: slow sand filter, double filter layer, single layer, sand, anthracite, drinking water, rural communities e water treatment, utilizando o Portal de Periódicos da Capes. A tabela reúne pesquisas que demonstram avanços na aplicação da filtração lenta, evidenciando sua eficiência em diferentes contextos e condições experimentais. Os estudos revisados empregam materiais filtrantes, como areia de granulometrias variadas e pedregulho, e avaliam parâmetros de potabilidade importantes, incluindo turbidez, pH, carbono orgânico dissolvido - COD, nitrogênio amoniacal – NH₃-N e micro-organismos patogênicos, como bactérias, protozoários e vírus. Os resultados confirmam que a filtração lenta é uma tecnologia robusta e versátil, com alta eficiência na remoção de poluentes e aplicações em águas de diferentes origens, desde fontes brutas locais (superficial e subterrânea) até sistemas sintéticos de laboratório, contribuindo significativamente para a melhoria da qualidade da água em contextos rurais e urbanos.

Autores/Pais	Material filtrante e suporte	Parâmetros de potabilidade monitorados	Tipo de amostra	Eficiência dos filtros lentos – principais resultados
Liu, Li e Li (2023)/China	areia fina, e grossa, pedregulho fino e grosso.	turbidez, nitrogênio amoniacal, fósforo total, e carbono orgânico dissolvido.	água sintética (laboratório).	Boa eficiência na remoção de contaminantes dependendo do tipo de filtro e condições de operação.
Agrawal, Sharma e Sharma (2021)/India	areia fina, pedregulho fino e grosso.	pH, oxigênio dissolvido, cor, sólidos totais dissolvidos, turbidez, salinidade e condutividade	água bruta coletada de uma fonte local.	De forma geral, as características químicas, físicas e biológicas da água bruta foram significativamente melhoradas.
Andreoli e Sabogal-Paz (2020)/Brasil	areia fina e grossa, pedregulho fino e grosso	<i>E. Coli</i> , <i>G. muris cysts</i> and <i>C. parvum oocysts</i> turbidez, temperatura, pH, carbono orgânico total, oxigênio dissolvido.	água subterrânea	Os filtros foram eficazes, especialmente após a maturação biológica acelerada pela introdução de água de rio.
Ji et al. 2022/ China	areias de diferentes granulometrias	carbono orgânico dissolvido, nitrogênio amoniacal, turbidez e pH e metais traço.	água coletada em diferentes pontos e água sintética	A eficiência dos filtros variou com o tamanho das partículas, com altas taxas de remoção dos poluentes.
Napotnik, Baker e Jellison, 2021/EUA	areia de diferentes granulometrias	bactérias (coliformes totais e <i>E. coli</i> , protozoário (<i>Cryptosporidium parvum</i>) e vírus (MS2 colifago)).	água sintética	Alta eficiência na remoção de cistos de protozoários, bactérias e vírus.
Freitas e Sabogal-Paz, 20119/Brasil	areia fina e grossa	<i>E. Coli</i> , turbidez,	água sintética	alta remoção de turbidez e <i>E. Coli</i> operando em condições diversas.

Tabela 3 – Compilado de publicações em periódicos internacionais a respeito do tema filtração lenta.

Fonte: Autora, 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este estudo confirmou a eficácia de filtros lentos em escala domiciliar para o tratamento de água, demonstrando que o sistema é uma solução viável e sustentável para comunidades rurais com acesso limitado a água tratada. A eficiência na remoção de turbidez, a estabilidade do pH e a resiliência às variações de temperatura evidenciaram o potencial dos filtros lentos em melhorar a qualidade da água sem a necessidade de recursos tecnológicos complexos. A análise microbiológica da água tratada revelou ausência de coliformes totais e *Escherichia coli*, comprovando a segurança microbiológica do sistema e reforçando sua eficácia na proteção contra doenças de transmissão hídrica. Além disso, a camada biológica (*Schmutzdecke*) demonstrou ser um componente importante para a retenção de partículas e microrganismos, reforçando o papel desse sistema como uma alternativa robusta para garantir a segurança hídrica.

A aplicação do sistema com água bruta da comunidade Aratinga, representando condições reais de uso, validou sua adaptabilidade e eficiência em cenários práticos. Os resultados obtidos indicam que filtros lentos podem ser implantados em comunidades isoladas como uma solução acessível, de fácil manutenção e com impacto positivo direto na saúde pública.

Ao alinhar-se às diretrizes da NBR 12216:1992 e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), este trabalho apresenta uma alternativa técnica e econômica para o tratamento de água, promovendo a replicabilidade do sistema em diferentes contextos rurais e contribuindo diretamente para o alcance do ODS 6. Estudos futuros poderão focar em melhorias no design dos filtros, ampliar o monitoramento microbiológico e avaliar a eficiência do sistema em condições climáticas variadas e com fontes de água mais complexas. Além disso, parâmetros de projeto como profundidade do leito filtrante, distribuição granulométrica dos materiais, taxa de filtração e altura da camada sobrenadante serão avaliados para otimizar o desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS

Abdiyev, K.; Azat, S.; Kuldeyev, E.; Ybyraimkul, D.; Kabdrakhmanova, S.; Berndtsson, R.; Khalkhabai, B.; Kabdrakhmanova, A.; Sultakhan, S. Review of Slow Sand Filtration for RawWater Treatment with Potential Application in Less-Developed Countries. **Water**, 15, 2007, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15112007>.

Agência Nacional de Águas - ANA. Relatório Nacional sobre o ODS 6 – Brasil. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2023.

Agrawal, A.; Sharma, N.; Sharma, P. Designing a low-cost slow sand filter for domestic use to improve water quality parameters. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 1582-1586, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.450>.

Andreoli, F. C.; Sabogal-Paz, L. P. Household slow sand filter to treat groundwater with microbiological risks in rural communities. **Water Research**, v. 186, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116352>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 11799:2016 - Material filtrante – Areia, antracito e pedregulho – Especificação**. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12216:1992 - Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público**. Rio de Janeiro, 1992.

Baldez, S. D. Estudo de dimensionamento de filtro lento retrolavável de camada simples (areia) e dupla camada filtrante (areia e antracito). Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, RS, 2023.

Barros, T. C. de. Avaliação da remoção de turbidez em filtros do tipo rápido de fluxo descendente sob diferentes concentrações de pré-cloração. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Alagoas, Campus Sertão, Delmiro Gouveia, AL, 2019.

Bianchi, A. F.; dos Santos, S. S. C.; Sasso, E. L.; Ferrarini, S. F.; Berreta, M. dos S. R. Avaliação da qualidade da água em pontos de captação na comunidade Aratinga, São Francisco de Paula/RS. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, 13., Teresina/PI, 2022. DOI: 10.55449/congea.13.22.VIII-019.

Brasil. **Ministério da Saúde. Portaria MS 888**, de 4 de maio de 2021. Brasília: Ministério da Saúde, 2021.

Da Silva, D. E.; Cordeiro, J.; Calazans, G. M.; Vieira, E. D.; Sousa Pereira, S. L. C. Análise da eficiência da filtração lenta para o tratamento de água de uma nascente situada na zona rural de Passabém – MG. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 7, n. 6, p. 25-30, 2018.

De Souza, G. S.; Teixeira, G. L.; Conde, I. A.; Rodrigues, J. V. Filtros Lentos Domiciliares (FLDs) aplicados ao tratamento de água em comunidades isoladas: uma breve revisão crítica. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Anhembi Morumbi, SP, 2022.

Dos Santos, G. S.; Paes, T. A. S. V.; Pessoa, T. B. A. Qualidade da água de consumo de comunidades rurais do Vale do Jiquiriçá (Bahia): análise microbiológica e percepção dos indivíduos. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 11, n. 2, p. 2-16, 2023.

Freitas, B. L. S. Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas com risco microbiológico em comunidades isoladas. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Freitas, B. L. S.; Sabogal-Paz, L. P. Pretreatment using Opuntia cochenillifera followed by household slow sand filters: technological alternatives for supplying isolated communities. **Environmental Technology**. 2019. ISSN: 0959-3330. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1582700>.

Gil, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

Huisman, L.; Wood, W. E. **Slow Sand Filtration**. Geneva: World Health Organization, 1974. ISBN 9241540370.

Ji, X.; Zhao, C.; Lv, Y.; Yang, J.Y.; Li, B. Influence of Particle Size of River Sand on the Decontamination Process in the Slow Sand Filter Treatment of Micro-Polluted Water. **Water** 2022, 14, 100. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14010100>

Klein, L. R.; Bisognin, R. P.; Figueiredo, D. M. Dos S. Estudo do perfil epidemiológico dos surtos de doenças de transmissão hídrica e alimentar no Rio Grande do Sul: uma revisão dos registros no Estado. **Hygeia**, v. 13, n. 25, p. 48-64, 2017.

Lakatos, E. M.; Marconi, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

Liu, H.; Li, X.; Li, N. Application of bio-slow sand filters for drinking water production: Linking purification performance to bacterial community and metabolic functions. **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103622>.

Llima, A. De J. Análise comparativa da eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencionais e não convencionais. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020.

Maciel, P. M. F. Filtração lenta domiciliar como alternativa de tratamento de água em comunidades isoladas: eficiências com e sem controle de nível da água e estímulo do amadurecimento. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Maiyo, J. K.; Dasika, S.; Jafvert, C. T. Slow sand filters for the 21st century: A review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 1019, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20021019>.

Ministério da Saúde. **Surtos de doenças de transmissão hídrica e alimentar (DTHA). Informe técnico**. Brasília: Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente, 2024.

Murtha, N. A. Avaliação da influência de variáveis hidráulicas, parâmetros de projeto e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

Mwabi, J. K.; Mamba, B. B.; Momba, M. N. B. Removal of *Escherichia coli* and Faecal Coliforms from Surface Water and Groundwater by Household Water Treatment Devices/Systems: A Sustainable Solution for Improving Water Quality in Rural Communities of the Southern African Development Community Region. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 9, p. 139-170, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph9010139>. ISSN 1660-4601.

Napotnik, J. A.; Baker, D.; Jellison, K. L. Influence of sand depth and pause period on microbial removal in traditional and modified biosand filters. **Water Research**, v. 189, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116577>.

Pizzolatti, B. S. Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

Trata Brasil. **Ranking do Saneamento 2024**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024.

Unesco. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos – Água para Todos: Soluções Inovadoras**. Paris: UNESCO, 2024.

Yamaguchi, M. U.; Cortez, L. E. R.; Ottoni, L. C. C.; Oyama, J. Qualidade microbiológica da água para consumo humano em instituição de ensino de Maringá-PR. **O Mundo da Saúde**, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 312-320, 2013.