



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE-UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR-CCTA
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL-UACTA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CAMPUS DE POMBAL-PB

PEDRO IGOR RODRIGUES PIANCÓ

**AVALIAÇÃO DE UM FILTRO LENTO COM MEIO FILTRANTE ALTERNATIVO NO
TRATAMENTO DE ÁGUA DE RIO**

POMBAL-PB

2023

PEDRO IGOR RODRIGUES PIANCÓ

**AVALIAÇÃO DE UM FILTRO LENTO COM MEIO FILTRANTE ALTERNATIVO NO
TRATAMENTO DE ÁGUA DE RIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como pré-requisito obrigatório para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Andréa Maria Brandão Mendes de Oliveira

POMBAL-PB

2023

P581a Piancó, Pedro Igor Rodrigues.

Avaliação de um filtro lento com meio filtrante alternativo no tratamento de água de rio / Pedro Igor Rodrigues Piancó. – Pombal, 2023. 56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Profa. Dra. Andréa Maria Brandão Mendes de Oliveira”.
Referências.

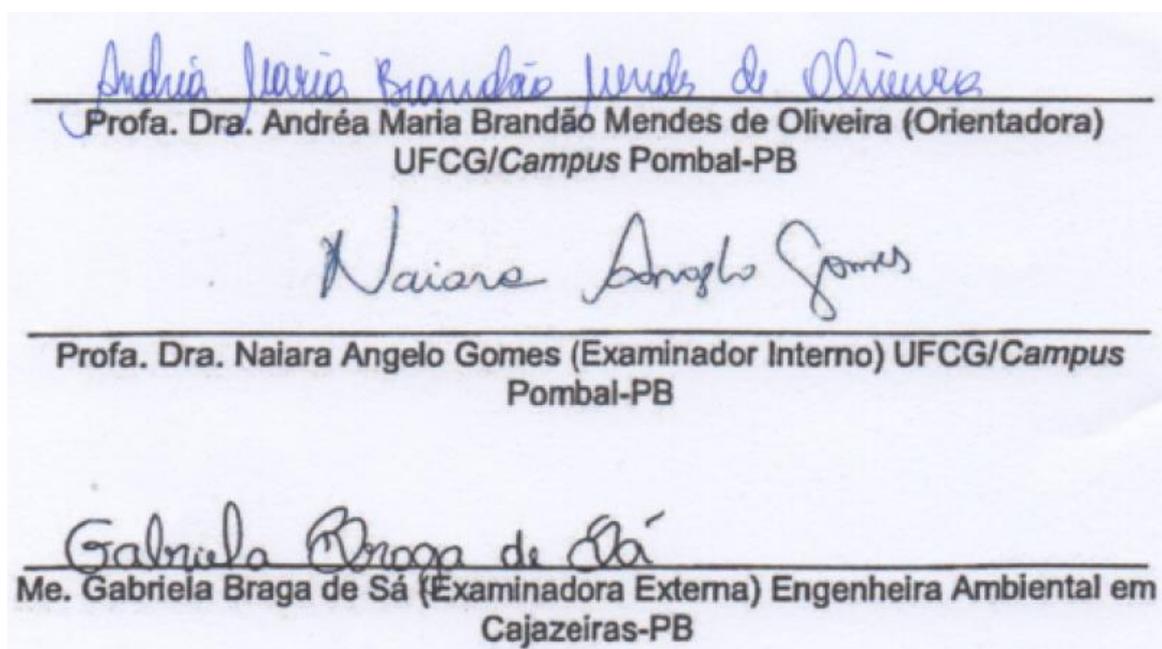
1. Tratamento de água. 2. Filtração lenta. 3. Resíduo de caulim. 4. Retrolavagem. 5. Camada biológica. I. Oliveira, Andréa Maria Brandão Mendes de. II. Título.

CDU 628.16 (043)

Pedro Igor Rodrigues Piancó

**AVALIAÇÃO DE UM FILTRO LENTO COM MEIO FILTRANTE ALTERNATIVO NO
TRATAMENTO DE ÁGUA DE RIO**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental, do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB, pela seguinte banca examinadora:



Pombal, 26 de junho de 2023.

Dedico este trabalho aos meus pais, Vaval e Júcia, vocês são o motivo do homem que sou hoje, são a minha fortaleza em momentos de dificuldades e minha inspiração de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e abençoado nessa trajetória importante da minha vida.

Aos meus pais e irmã, que sempre me apoiaram nos mais diversos momentos e nunca deixaram faltar nada.

Em especial ao meu amigo e irmão por consideração, Wandson de Lima Brito, que fez parte de toda minha formação como pessoa, sempre esteve comigo nas horas boas e ruins, mas que agora vive ao lado de Deus, me protegendo mesmo estando longe.

Aos meus amigos da graduação, principalmente a Naedna Medeiros, Francisco de Assis e José Altair por todo o apoio, horas de estudo e incentivos nos momentos de dificuldades durante o curso.

A minha orientadora Andréa Maria Brandão Mendes de Oliveira, por me acolher nessa etapa final de graduação e por adicionar conhecimentos a esta pesquisa.

A professora Thâmara Martins Ismael de Sousa, por ter me dado a oportunidade de desenvolver esta pesquisa no âmbito do saneamento, sem ela este trabalho não existiria.

Ao técnico do laboratório de análise de água, Luiz Fernando, por todos os ensinamentos durante as práticas de laboratório e mais do que isso, por se tornar um grande amigo e mentor.

Aos meus amigos do futebol Jean Paiva e Tailson Andrade, que sempre marcam presença nos momentos de resenha.

Às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

A banca examinadora, por contribuir com as correções para que este trabalho se tornasse melhor.

Por fim, a todos os professores e colegas de aula, pelos conhecimentos que me foram repassados.

*Faça o teu melhor, na condição que você tem,
enquanto você não tem condições melhores, para
fazer melhor ainda*

Mario Sergio Cortella

PIANCÓ, P. I. R. **Avaliação de um filtro lento com meio filtrante alternativo no tratamento de água de rio**. 2023. 56 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. Pombal-PB, 2023.

RESUMO

A filtração lenta é um sistema de tratamento de água indicado, principalmente, para o atendimento de comunidades rurais e isoladas, onde o acesso à água potável é mais difícil. Com o emprego da filtração lenta é possível remover, eficientemente, impurezas contidas na água, abrangendo partículas suspensas, dissolvidas e microrganismos patogênicos, por meio da passagem pelo meio filtrante. Dito isto, este trabalho objetivou avaliar o tratamento de água de rio em um filtro lento com meio filtrante alternativo de resíduo de caulim, bem como o emprego da retrolavagem em benefício da limpeza dos filtros. Para esse propósito, empregou-se um filtro lento em escala piloto, com camada tripla de resíduo de caulim em diferentes granulometrias, fluxo descendente e regime intermitente de operação. O filtro foi alimentado diariamente com água de rio, salvo em fins de semana e feriados e a taxa de filtração de $6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ foi mantida pelo controle da vazão em um rotâmetro instalado na entrada no filtro. Para avaliar a eficiência do tratamento, analisaram-se os parâmetros turbidez, cor aparente, pH, condutividade elétrica, coliformes totais e *Escherichia coli* (*E. coli*). Os resultados demonstraram que o filtro removeu $58,04 \pm 1,91\%$ de turbidez, $49,84 \pm 4,69\%$ de cor aparente, o pH permaneceu entre as faixas 6 a 9, condutividade elétrica apresentou média de $273,11 \pm 3,49 \mu\text{S}/\text{cm}$, removeu também $1,24 \pm 0,01 \text{ log}$ de coliformes totais e $1,19 \pm 0,01 \text{ log}$ de *E. coli*. Portanto, os resultados foram importantes para incentivar e apontar uma possível utilização do resíduo do caulim, contribuindo para a sustentabilidade dessa atividade, além de colaborar com o entendimento do tratamento de água em filtros lentos com meio filtrante alternativo, abrangendo possibilidades de potabilidade da água em regiões de difícil acesso e em situações de escassez de areia.

Palavras-chave: Filtração lenta; caulim; retrolavagem; camada biológica.

PIANCÓ, P. I. R. **Evaluation of a slow filter with alternative filter medium in the treatment of river water**. 2023. 56 pages. Completion of course work (Graduation in Environmental Engineering) – Federal University of Campina Grande. Pombal-PB, 2023.

ABSTRACT

Slow filtration is a water treatment system indicated, mainly, for serving rural and isolated communities, where access to drinking water is more difficult. With the use of slow filtration, it is possible to efficiently remove impurities contained in the water, including suspended and dissolved particles and pathogenic microorganisms, by passing through the filter medium. That said, this work aimed to evaluate the treatment of river water in a slow filter with an alternative filtering medium of kaolin residue, as well as the use of backwashing to benefit the cleaning of the filters. For this purpose, a pilot-scale slow filter was used, with a triple layer of kaolin residue in different particle sizes, descending flow and intermittent operation. The filter was fed daily with river water, except on weekends and holidays, and the filtration rate of 6 m³/m².day was maintained by controlling the flow in a rotameter installed at the filter inlet. To evaluate the efficiency of the treatment, the parameters turbidity, apparent color, pH, electrical conductivity, total coliforms and Escherichia coli (E. coli) were analyzed. The results showed that the filter removed 58.04 ± 1.91% of turbidity, 49.84 ± 4.69% of apparent color, the pH remained between ranges 6 to 9, electrical conductivity averaged 273.11 ± 3.49 µS/cm, also removed 1.24 ± 0.01 log of total coliforms and 1.19 ± 0.01 log of E. coli. Therefore, the results were important to encourage and point out a possible use of kaolin residue, contributing to the sustainability of this activity, in addition to collaborating with the understanding of water treatment in slow filters with an alternative filtering medium, covering possibilities of water potability in regions of difficult access and in situations of sand scarcity.

Keywords: Slow filtration; kaolin; backwash; biological layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – histórico da filtração lenta ao longo dos anos.....	18
Figura 2 – Esquema representativo dos mecanismos de transportes	22
Figura 3 – Localização do município de Pombal-PB com ampliação de imagem no rio Piranhas.	28
Figura 4 – Localização do ponto de coleta de água no rio Piranhas	29
Figura 5 – Fluxograma conforme as etapas metodológicas da pesquisa	30
Figura 6 – Resíduo da mineração de caulim disposto diretamente no solo.....	31
Figura 7 – Sistema completo de filtração lenta	32
Figura 8 – Funcionamento dos filtros e percurso da água.....	34
Figura 9 – Comportamento do pH da água bruta e tratada	37
Figura 10 – Comportamento da CE na água bruta e tratada.....	38
Figura 11 – Comportamento da turbidez da água bruta e tratada	39
Figura 12 – Comportamento da cor aparente da água bruta e tratada.....	41
Figura 13 – Comportamento dos coliformes totais presentes na água bruta e tratada	43
Figura 14 – Comportamento da <i>E. coli</i> presente na água bruta e tratada	46
Figura 15 – Retrolavagem do FL3C: A) Início da retrolavagem com bastante impurezas e microrganismos; B) Final da retrolavagem.....	49
Figura 16 – Eficiência da retrolavagem: A) Desenvolvimento completo da camada biológica; B) Leito filtrante após a retrolavagem.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média dos resultados obtidos e p-valor.....	36
Tabela 2 – Eficiência de remoção e p-valor.....	36
Tabela 3 – Valores de coliformes totais e eficiência de remoção	43
Tabela 4 – Valores encontrados de <i>E. coli</i>	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE	Condutividade Elétrica
Col. totais	Coliformes Totais
CV	Cavalo de Potência
DP	Desvio Padrão
<i>E. coli</i>	Escherichia coli
FL2C	Filtro Lento com 2 Camadas de Caulim
FL3C	Filtro Lento com 3 Camadas de Caulim
Laag	Laboratório de análise de águas
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
pH	Potencial Hidrogeniônico
Turb	Turbidez
UFC	Unidade Formadora de Colônias
uH	Unidade Hazen
UV	Ultra Violeta
VMP	Valor Máximo Permitido
μS	Microsiemens

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 GERAL	16
2.2 ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 HISTÓRICO DA FILTRAÇÃO LENTA	17
3.2 FILTRAÇÃO LENTA	18
3.3 MECANISMOS DA FILTRAÇÃO	20
3.3.1 Mecanismos de transporte	21
3.3.2 Mecanismos de aderência	23
3.4 FILTRO CONVENCIONAL E ALTERNATIVOS	23
3.5 RETROLAVAGEM	24
3.6 RESÍDUO DA MINERAÇÃO DE CAULIM	26
4 METODOLOGIA	28
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	28
4.2 ETAPAS METODOLÓGICAS DA PESQUISA	30
4.3 COLETA E PREPARAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM	30
4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO LENTA COM RETROLAVAGEM	31
4.2.1 Retrolavagem	33
4.5 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO LENTA	33
4.6 ANÁLISES DE ÁGUA BRUTA E TRATADA	35
4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 pH	36
5.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	38
5.3 TURBIDEZ	39
5.4 COR APARENTE	41
5.5 COLIFORMES TOTAIS	42
5.6 ESCHERICHIA COLI	45
5.7 RETROLAVAGEM E CARREIRA DE FILTRAÇÃO	48
6 CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica é essencial para a vida humana, para o desenvolvimento econômico e para a sustentabilidade do planeta. Historicamente, ao deixarem de ser nômades, as populações se desenvolveram em torno de fontes hídricas capazes de suprir suas necessidades e anseios, iniciando as atividades de agricultura e criação de animais, permitindo a produção de insumos para a sua sobrevivência e manutenção.

Em geral, o ciclo hidrológico garante que toda a água do planeta permaneça com o mesmo volume (AGÊNCIA BRASIL, 2018), muito embora situações de escassez têm sido cada vez mais recorrentes, seja em termos quantitativos ou mesmo qualitativos. Em virtude do crescimento da população mundial e o desenvolvimento industrial, a demanda por água cresceu e, conseqüentemente, cresceu também a geração de águas residuárias domésticas e industriais. As águas residuárias retornam para a natureza, e, eventualmente, para os próprios corpos d'água dos quais se retira água para abastecimento, além disso, a qualidade das águas naturais é deteriorada devido ao uso exacerbado de agrotóxicos, inseticidas e produtos químicos em atividades agrícolas (TRECE *et al.*, 2020).

Diante da necessidade de tratamento da água para o consumo humano, são empregadas diferentes técnicas de tratamento visando a adequação da qualidade da água aos requisitos estabelecidos pela legislação vigente. Destacando-se, o tratamento convencional para águas de bacias hidrográficas não protegidas, desinfecção e correção do pH para águas subterrâneas, filtração lenta ou rápida a depender da qualidade do manancial, entre outras tecnologias (CONAMA 357, 2005).

A filtração lenta é uma das mais antigas técnicas para tratamento de água, de acordo com Nelson (2020), essa tecnologia é capaz de remover cor, turbidez e microrganismos patogênicos através da percolação da água no meio filtrante, sendo em sua maioria constituído de areia em granulometrias conhecidas. Em algumas regiões do mundo, foram relatadas situações de escassez de areia (BENDIXEN *et al.*, 2019), por esse motivo, tem crescido a pesquisa por novos meios filtrantes a serem empregados em sistemas de filtração.

O resíduo da mineração de caulim pode ser uma alternativa para substituição total ou parcial da areia comumente utilizada em filtros. O caulim é um minério composto por silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita. Um dos seis minerais mais abundantes da crosta terrestre (BRASIL MINAS, 2021), o caulim é explorado em todo o mundo e empregado na fabricação de diversos produtos, principalmente na indústria do papel, seguido pelo mercado de cerâmicas, além de artigos de porcelana, borracha, plásticos e outros (FRIZZO, 2018).

Na exploração de caulim são gerados grandes volumes de resíduos que são, na maioria das vezes, dispostos diretamente no solo em áreas próximas às usinas, sem qualquer forma de tratamento ou observância de normas e leis. Deste modo, surgiram estudos para reaproveitamento do resíduo da mineração de caulim, sendo muito usado na construção civil, como mostra Burkhard (2018) e Sousa *et al.* (2007). No entanto, existem poucos trabalhos que adentrem a fundo na área de tratamento de água.

Dito isto, para esta pesquisa, foi empregado o resíduo da mineração de caulim como meio filtrante alternativo em um filtro lento voltado ao abastecimento de comunidades isoladas, buscando contribuir com aspectos de cunho ambiental, social e econômicos, bem como com a sustentabilidade na exploração e disposição dos resíduos da mineração.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar o tratamento da água do rio Piranhas em um filtro lento empregando resíduo de caulim como meio filtrante.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar a qualidade da água bruta e filtrada em relação aos indicadores: pH, condutividade elétrica, turbidez, cor aparente, coliformes totais e *E.coli*;
- Observar a variação na eficiência de tratamento ao longo de tempo de operação;
- Analisar a viabilidade do emprego do resíduo de caulim na retrolavagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO DA FILTRAÇÃO LENTA

Filtração lenta, é considerada uma tecnologia antiga para tratamento da água, devido a isso, é uma técnica estudada e consolidada, com eficiência de remoção de microrganismos, cor aparente e turbidez (RODRIGUES, 2022). Em 1804, John Gibbs elaborou e construiu o primeiro filtro lento, na Escócia, cidade Paisley. Inicialmente, os processos de filtração foram sendo observados e notava-se que a água ficava sem gosto, cor e turbidez, pronta para o consumo (COSTA, 1980 e HESPANHOL, 1969).

Segundo Stüpp (2016), a filtração lenta passou a ser introduzida em Londres, no ano de 1829, para abastecimento público. No entanto, com a intensificação dos estudos realizados, concluíram que a filtração removia uma substância que ocasionava doenças na população. Somente a partir da década de 1860, que análises bacteriológicas começaram a ser introduzidas.

Em 1892, desencadeou-se uma epidemia de cólera na cidade de Hamburgo, totalizando 8600 vítimas fatais (dados retirados da emissora internacional da Alemanha, Deutsche Welle, 2014). Enquanto em uma cidade vizinha, Altona, que abrangia tecnologias voltadas ao tratamento de água para abastecimento, mais precisamente a filtração lenta, a proliferação de cólera foi quase inexistente. Vale salientar, que essa doença é transmitida por ingestão de água contaminada.

No final dos anos 1800, a filtração lenta foi implementada nos Estados Unidos e posteriormente na Nova Inglaterra. Após dez anos, começaram a implementar a cloração da água, garantindo a desinfecção, diminuindo de maneira significativa a contaminação da população decorrente de doenças por veiculação hídrica. É apresentado na Figura 1, um resumo ilustrativo acerca dos principais acontecimentos históricos da filtração lenta.

Figura 1 – histórico da filtração lenta ao longo dos anos



Fonte: Autoria própria (2023).

Devido à baixa taxa de filtração, ou seja, pequena quantidade de água filtrada por dia e requerimento de grandes áreas para implantação dos filtros, já que tratava pouca água por m^2 , veio a surgir novas formas de tratamento a partir da década de 70, substituindo os filtros lentos por filtros rápidos. No entanto, ainda é uma maneira de garantir água potável em comunidades específicas, onde o tratamento convencional é economicamente inviável.

3.2 FILTRAÇÃO LENTA

A filtração lenta, também conhecida como filtração biológica, é uma técnica de tratamento de água que visa a remoção de impurezas a partir de um conjunto de mecanismos biológicos, físicos e químicos. Nesse processo, são empregados meios granulares, geralmente de granulometria fina, com tamanho efetivo de 0,25 a 0,35 mm, por onde a água escoar em baixa velocidade (ABNT, 1992).

No que diz respeito à taxa de filtração, tendo como conceito o volume de água que passa em determinada área filtrante, abrangendo também um período de tempo. No qual, segundo a ABNT NBR 12216 (1992), o emprego de baixas taxas de filtração, não deve ser superior a $6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, garantindo a elevada eficiência na remoção de impurezas e microrganismos.

Filtro lento tem essa denominação devido a baixas taxas de filtração, no entanto há algumas divergências de autores quanto a essa valoração. Alguns acreditam que para ser considerado filtro lento é necessária uma taxa de $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$

(BELLAMY *et al.*, 1985) a $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008; ABNT NBR 12216, 1992); variando de $2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ a $14 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ (VALENCIA, 1981); podendo também variar entre $2,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ a $9,6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ (HUISMAN; WOOD, 1974).

Durante a filtração, ocorre a remoção de sólidos em suspensão, substâncias coloidais, microrganismos patogênicos e substâncias químicas. Isso acontece em virtude de alguns fatores, em específico a ação mecânica, sedimentação das partículas sobre os grãos do meio filtrante, floculação de partículas que são formadas através do maior contato entre elas e por meio da formação da camada biológica na superfície do leito filtrante. Essa mesma camada tem um aspecto gelatinoso devido aos microrganismos em desenvolvimento estarem em contato com a lâmina d'água (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019).

Um fator determinante para a purificação da água em filtros lentos é o desenvolvimento de *schmutzdecke*, camada biológica complexa aderida ao meio filtrante, devido ao longo contato da água com o material no topo do filtro. O surgimento dessa camada permite uma atividade microbiológica que é importante para remoção de bactérias e outros organismos patogênicos.

A eficiência do filtro lento está diretamente relacionada a progressão da *schmutzdecke*, podendo demorar dias até o amadurecimento (MACIEL, 2018). Devido a importância dessa camada, é essencial manter uma lâmina d'água de 5 cm na parte superior do leito filtrante, garantindo o desenvolvimento rápido dos microrganismos, sendo essa a seção de maior remoção de patógenos (PFANNES *et al.*, 2015).

Nos filtros utilizados no processo de tratamento da água de fluxo descendente, a água escoar por todo o dispositivo através da ação da gravidade, ou seja, a entrada da água bruta é na parte superior. Essa é uma vantagem significativa em relação a filtração ascendente, no qual precisa de bombeamento para elevação do fluido no filtro.

É uma tecnologia descentralizada de tratamento, de simples concepção e implantação, manutenção simples (LIMA, 2020), não requer o uso de produtos químicos ou grande requerimento de energia elétrica, além de não precisar de profissionais especializados para manutenção (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008).

É um método de tratamento que não necessita de coagulação, além de ser baseado em mecanismos de filtração de transporte, ou seja, as partículas ficam em

contato com o meio filtrante, onde ocorre a ação de coar, sedimentação, impacto inercial, difusão, atração de massas e atração eletrostática (HUISMAN e WOOD, 1974).

A filtração lenta apresenta como principais limitações, segundo Di Bernardo (2008), se a turbidez da água bruta for maior que 10 NTU, pode comprometer a eficiência do tratamento. Além do mais, quando há presença de grande quantidade de algas, também é um fator indesejado quanto a eficácia do tratamento empregado.

Entretanto, há um consenso na literatura que a filtração lenta pode atingir eficiências médias de turbidez menor que 1 NTU (GALVIS *et al.*, 1998 e CLEARY, 2005), eficiência na remoção da cor verdadeira 25 a 40% (GALVIS *et al.*, 1998 e CLEARY, 2005) e 30 a 100% (VISSCHER, 1990), matéria orgânica de 60 a 75% (VISSCHER, 1990). Vale ressaltar, que quanto melhor a qualidade da água bruta, melhor será os parâmetros da água filtrada.

Diante dos aspectos já mencionados, incluindo taxa de filtração, remoção de partículas, vantagens e desvantagens dos filtros lentos, observa-se que a filtração lenta é uma boa alternativa a ser implementada em comunidades isoladas e de pequeno porte. Sendo de fácil manuseio e manutenção, além de uma eficiência significativa na remoção da cor, turbidez, microrganismos e algas filamentosas.

Como já demonstrado as taxas de filtração e demais especificações do filtro lento, é de suma importância adentrar no tema mecanismos de filtração, retratando sobre o comportamento das partículas presentes na água bruta em relação as etapas de filtração no decorrer do filtro.

3.3 MECANISMOS DA FILTRAÇÃO

É através da filtração da água, no qual a mesma passa por uma região gelatinosa e outra porosa, normalmente composta de areia, todavia, pode ser utilizado outro material como meio filtrante. Há também a possibilidade de empregar mais de uma camada, sendo da mesma substância em granulometria diferente ou de diferentes materiais. O objetivo é reter ou remover algumas das impurezas contidas na água (SCHORR, 2022).

Contudo, o método de remoção das partículas presentes na água é de duas maneiras principais, sendo mecanismos de transporte (coagem, sedimentação, interceptação, difusão, forças hidromecânicas e impacto inercial) e aderência (forças

de van der Waals, forças eletrostáticas e pontes químicas), mas é importante frisar, que filtração por si só não é suficiente para remover todas as impurezas contidas na água (LIMA, 2020).

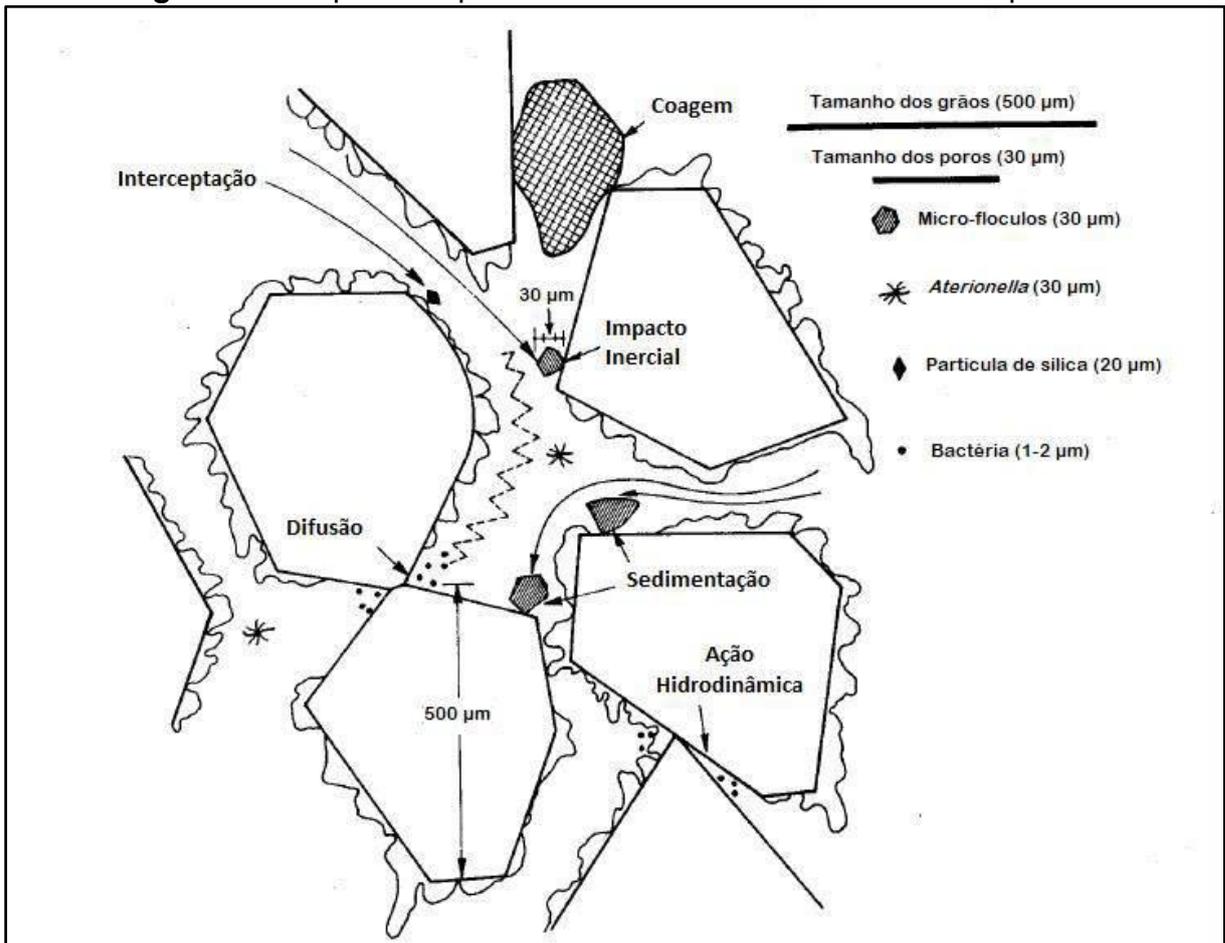
Há também um mecanismo biológico que está atrelado ao mecanismo de transporte, situado no topo do meio filtrante. Sendo considerado por alguns autores como a principal etapa de tratamento da água durante a filtração lenta, em razão da capacidade de remover eventuais patógenos causadores de doenças.

3.3.1 Mecanismos de transporte

Este mecanismo é encarregado de transportar as partículas em suspensão até a superfície do material filtrante, da seguinte maneira: a água escoar por uma cavidade porosa no qual as partículas presentes no fluido se sedimentam durante o percurso no leito filtrante, enquanto outras partículas maiores ficam retidas na parte superior do filtro. Além disso, outros fatores influenciam nos demais mecanismos, como a temperatura da água e velocidade de escoamento (BRINCK, 2009).

Dentre os mecanismos citados, podem ser melhor entendidos na Figura 2, apresentando o comportamento das partículas de impurezas contidas na água durante o processo de filtração lenta.

Figura 2 – Esquema representativo dos mecanismos de transportes



Fonte: LIMA (2020).

- Coagem: é um efeito de caráter físico, no qual as partículas maiores presentes na água são retidas na camada superior do leito filtrante (VALENCIA, 1972);
- Intercepção: conforme a água passa pelo sistema de filtração, o fluido ganha velocidade, logo a energia cinética também aumenta, fazendo com que as partículas menores se juntem, formando então partículas maiores que não são capazes de passar por meio dos poros do leito filtrante (VALENCIA, 1972);
- Difusão: o movimento browniano cujo as partículas menores seguem um caminho aleatório, devido ao aumento da energia térmica, são transportadas para a superfície dos grãos de areia ou de qualquer meio filtrante alternativo (BRINCK, 2009);
- Impacto inercial: ocorre quando a partícula presente na água possui alta densidade e diâmetro grande, fazendo com que permaneça em seu trajeto

independente das curvas que o fluido faz, ou seja, fica em inércia, logo acontece um impacto da partícula com o grão do meio filtrante que consiste em sua retenção (BRINCK, 2009; VALENCIA, 1972);

- Forças hidrodinâmicas: as partículas maiores não esféricas, começam a rotacionar em torno de si mesmas, fazendo uma vibração aleatória similar ao movimento browniano, podendo estimular a colisão com a superfície dos grãos (BRINCK, 2009).

3.3.2 Mecanismos de aderência

Conforme a água se desloca através do sistema de tratamento, ocorrem fenômenos físico-químicos entre as partículas presentes no afluente com os grãos do meio filtrante. Portanto, os mecanismos de aderência permitem que as partículas interajam entre si, através de ligações químicas, podendo citar: forças de van der Waals, forças de origem eletrostática, pontes de hidrogênio e adsorção (LIMA, 2020).

De maneira geral, existem ligações fracas, moderadas e intensas entre as partículas presentes na água com o material filtrante, acarretando as interações dos mecanismos de aderência. Isso implica na eficiência do filtro lento de remover impurezas presentes na água.

3.4 FILTRO CONVENCIONAL E ALTERNATIVOS

Filtro convencional é constituído de apenas um leito filtrante de areia ou de leito duplo, sendo de areia e antracito. Seu principal objetivo é a remoção de partículas suspensas, dissolvidas, microrganismos patogênicos e substâncias químicas. O processo de tratamento da água é normalmente através da gravidade, onde a água passa pela(s) camada(s) de filtração.

O meio filtrante tem a função de aglutinar os particulados na superfície dos grãos de areia, através de mecanismos físico-químicos da filtração. Removendo as impurezas contidas na água bruta, que podem ser prejudiciais à saúde humana, logo, é o principal constituinte de um sistema de filtração de água (LIMA, 2020).

O principal meio filtrante e também mais estudado, é a areia. Devido ser um composto decorrente da desagregação de rochas, de volume abundante, sem a

presença de argila ou matéria orgânica. A areia tem a capacidade de remover a turbidez, impactando na melhoria do sabor e odor da água para abastecimento (HELLER, 2006).

É importante destacar, que a areia vem sendo substituída por materiais alternativos, e alguns dos motivos da substituição da areia, é devido a extração de grandes volumes do meio ambiente, leito de rios, escassez em algumas regiões e também materiais alternativos podem implicar em melhorias no tratamento. Essa retirada implica em problemas ambientais, como assoreamento dos rios e lagos (VIEIRA, 2015).

Existem alternativas eficientes no tratamento da água, que podem ser usadas na filtração para substituir a areia, ou até mesmo ser usado em conjunto, a exemplo de: carvão vegetal (LIMA, 2020), fibra de coco (FERNANDES, 2010), zeólita (CALABRIA, 2017), maravalha (LIMA, 2020), caulim (MONTE, 2020), argila paligosquita (SILVA, 2022), entre outros. Alguns destes já são bem consolidados na literatura, enquanto outros a exemplo do caulim e argila paligosquita ainda estão sendo desenvolvidos estudos a respeito da eficiência e viabilidade.

Ainda sobre o caulim (foco principal deste presente estudo), no qual a sua extração ocasiona em grandes pilhas de resíduos, vem sendo motivo de estudos do laboratório de águas da Universidade Federal de Campina Grande, *campus* Pombal, em que faz-se uso do resíduo da mineração de caulim como meio filtrante alternativo no tratamento de água para abastecimento.

3.5 RETROLAVAGEM

Na ocasião em que a camada biológica formada na parte superior do leito filtrante atingir uma altura que dificulta a vazão desejada, é quando será feito a retrolavagem do filtro lento (SCHORR, 2018). Nessa etapa, a água faz o percurso inverso, de baixo para cima, carregando todas as impurezas aderidas ao meio filtrante, incluindo o biofilme.

Uma pesquisa realizada por Pizzolatti (2010), fez um comparativo entre um filtro lento convencional, com um filtro lento retrolavável (utilizando água filtrada) e um filtro lento também retrolavável (porém, com água bruta para limpeza do material filtrante), ambos os filtros possuem as mesmas dimensões. Ao final desse estudo, foi observado que o sistema convencional obteve melhor resultado em relação aos

parâmetros de potabilidade da água, enquanto o filtro lento retrolavável com água filtrada, teve a melhor resposta em questão da lavagem do meio filtrante.

O sistema de retrolavagem é uma alternativa eficiente comparado ao método de remoção do material filtrante para lavagem, que consiste em retirar todo o meio filtrante e raspagem da areia para higienização, e posteriormente recolocado ao filtro, demandando tempo e um maior cuidado no modo de operação (WORMA, 2018).

Conforme Pizzolatti (2010), na maioria dos casos, na filtração lenta, a limpeza do meio filtrante é realizada através da raspagem da camada biológica e de alguns centímetros do material filtrante, porém essa técnica exige um trabalho manual e tempo elevado. Pizzolatti *et al.* (2015), chegaram ao resultado que mesmo com a eficiência da retrolavagem ligeiramente inferior a raspagem, ainda é vantajoso devido a facilidade de operação.

A água utilizada na retrolavagem tem um fluxo ascendente, no qual é bombeada, fazendo um trabalho inverso ao da filtração, carregando todas as partículas aderidas ao material filtrante para a calha de coleta e removidas através do extravasor, acarretando na limpeza do filtro lento.

Segundo Richter e Netto (1991, p. 254): “A lavagem deve ser feita a alta velocidade, no sentido ascendente, de modo a causar uma expansão do leito filtrante e, desde modo, arrastar o material depositado através do leito expandido [...]”. Portanto, quando a lavagem não é executada de maneira correta, permanecem flocos de impurezas aglutinadas aos grãos do material filtrante, criando fissuras e rachaduras na tecnologia de tratamento empregada.

Em caso da lavagem do filtro ser realizada de maneira errada, isso implica na diminuição da taxa de filtração, uma baixa eficiência na remoção das partículas presentes na água e a qualidade da água tratada pode ser contestada. Logo, é necessário atentar-se a essa etapa da filtração lenta.

Contudo, a retrolavagem estabelecida no filtro lento, tem a característica de expandir o material filtrante, exercendo uma força de arraste que retira as partículas sólidas indesejadas no sistema de tratamento. Em contrapartida, parte do biofilme também é retirado durante o processo, sendo um ponto parcialmente negativo para o tratamento de água, pois necessita dessa camada biológica para remoção de patógenos (LIMA, 2020).

3.6 RESÍDUO DA MINERAÇÃO DE CAULIM

O caulim é um tipo de argila composta principalmente de silicatos de alumínio hidratados, amplamente utilizado nas indústrias de cerâmica, papel, tintas, plásticos, cosméticos e outros setores. A mineração de caulim é uma atividade econômica importante em várias regiões do mundo, incluindo Brasil, Estados Unidos, China, Reino Unido e Alemanha como os principais países. No entanto, a mineração de caulim também pode gerar resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas, que podem ter impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana (LUZ *et al.*, 2008).

Os resíduos gerados pela mineração de caulim podem apresentar diversas características e composições, dependendo dos métodos de extração, processamento e disposição adotados. Esses resíduos podem conter uma variedade de minerais e elementos químicos, incluindo óxidos de ferro, titânio, alumínio, quartzo, feldspato e outros compostos (TOLENTINO JUNIOR, 2019). A disposição inadequada desses materiais tem potencial de contaminação do solo, da água e do ar, afetando ecossistemas locais e causando impactos negativos na qualidade da água potável, na biodiversidade, na agricultura e nas atividades humanas.

Vários estudos tem sido realizados para avaliar o impacto ambiental dos resíduos da mineração de caulim e buscam formas de minimizar ou mitigar esses impactos. Além disso, tem sido estudadas opções de aproveitamento dos resíduos de caulim, tal que a utilização como matéria-prima alternativa em outras indústrias, como na construção civil e na produção de materiais cerâmicos (NASCIMENTO, 2019).

O resíduo da mineração de caulim também tem sido explorado para aplicações relacionadas ao tratamento de água. O caulim, devido às suas características físicas e químicas, pode ser utilizado como coagulante/floculante natural em processos de tratamento de água, especialmente para remoção de partículas suspensas e corantes.

Outra aplicação do caulim relacionada ao tratamento de água é como adsorvente de contaminantes, como metais pesados e compostos orgânicos, devido à sua capacidade de adsorção (CAPONI, 2017). Estudos têm investigado o uso de caulim e seus resíduos como adsorventes em processos de tratamento de água para abastecimento, visando a remoção de partículas suspensas e solúveis, a

exemplo da pesquisa realizada por Monte (2020), na qual mostrou que o resíduo da mineração tem potencial para remoção de cor e turbidez em água de abastecimento público, apontando que o caulim pode ser uma alternativa viável e sustentável para o tratamento de água.

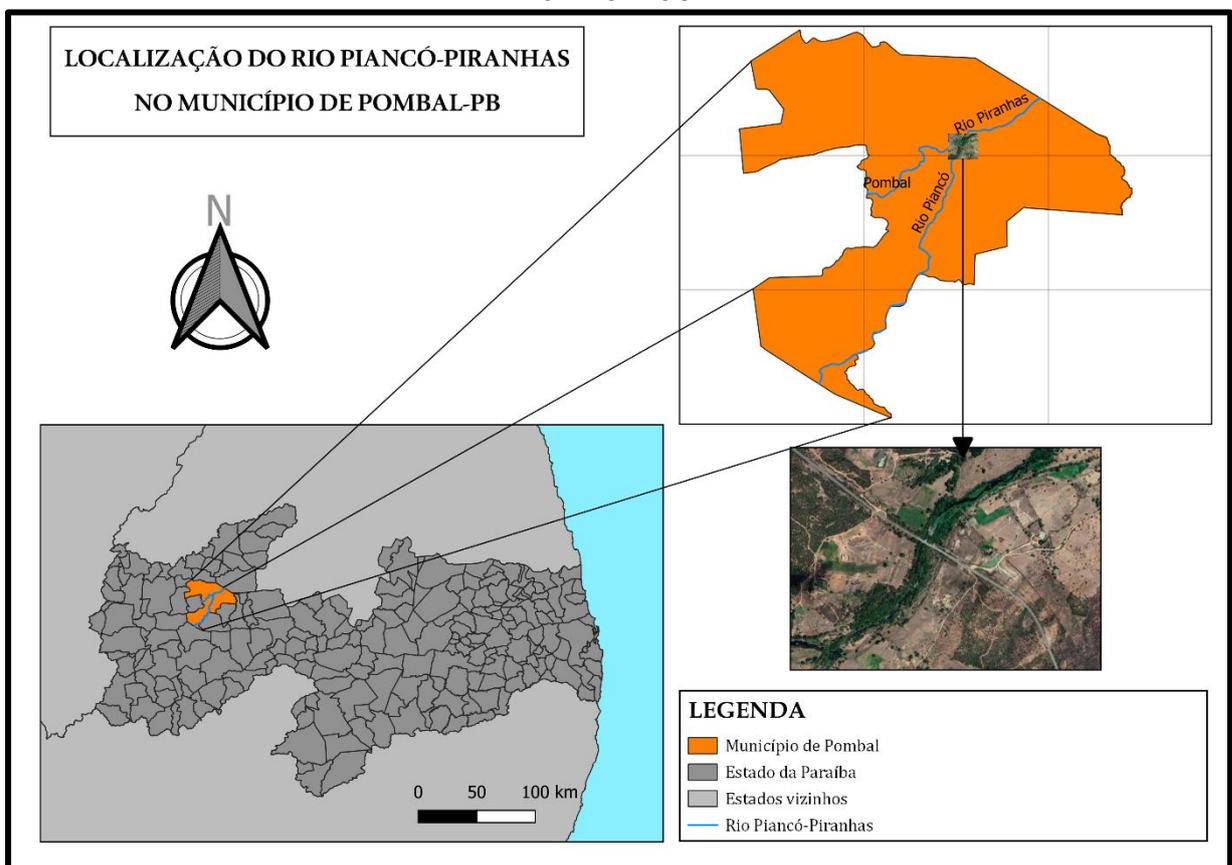
No entanto, é importante destacar que o uso de caulim ou resíduos de caulim no tratamento de água requer estudos específicos para cada caso, levando em consideração as características da água a ser tratada, a concentração dos contaminantes e as condições operacionais do processo.

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa situa-se no município de Pombal-PB, interior da Paraíba, distante 378,5 km da capital João Pessoa. Está representada a localização na Figura 3, abrangendo também os estados vizinhos e o ponto de coleta de água.

Figura 3 – Localização do município de Pombal-PB com ampliação de imagem no rio Piranhas.



Fonte: Autoria própria (2023).

O ponto específico de coleta de água localiza-se na bacia hidrográfica Piencó-Piranhas-Açu, sub bacia médio Piranhas paraibano. O local de acesso é através da BR-230 que corta o município de Pombal-PB, sertão da Paraíba, entre as coordenadas geográficas latitude de 6° 43' 31" S e longitude 37° 47' 51" O. O ponto de coleta está representado na Figura 4.

Figura 4 – Localização do ponto de coleta de água no rio Piranhas



Fonte: Autoria própria (2023).

A nascente do rio Piranhas-Açu está situada na Serra do Piancó, estado da Paraíba, enquanto sua foz situa-se no Oceano Atlântico, nas proximidades da cidade de Macau no Rio Grande do Norte, transpondo cerca de 400 km. É um rio intermitente assim como a maioria dos rios do Nordeste, no entanto, sua perenidade é acentuada devido aos dois reservatórios construídos, sendo eles Curema-Mãe d'Água na Paraíba e a barragem Armando Ribeiro Gonçalves no Rio Grande do Norte (ANA, 2010).

Os baixos registros pluviométricos e as irregularidades do regime associados a condição hidrogeológica, atrelada à região Nordeste, em particular ao semiárido brasileiro, contribuem para a redução da disponibilidade hídrica nessa região. Além do baixo índice de precipitação, denotam de elevadas temperaturas por todo o ano e altas taxas de evapotranspiração, configurando um balanço hídrico negativo, no qual há maior vaporização em relação a quantidade de chuvas (ANA, 2009).

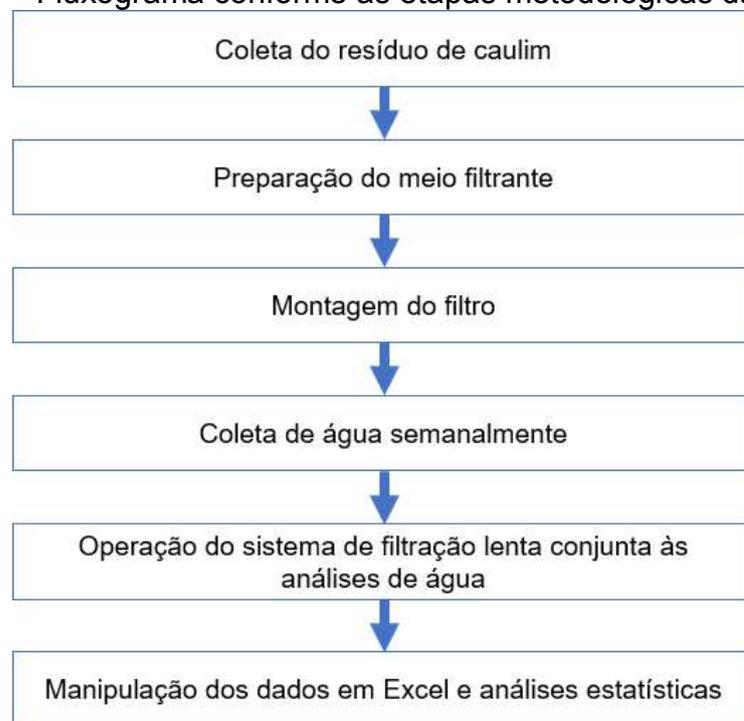
O rio Piranhas-Açu ou somente rio Piranhas na Paraíba, tem elevada importância no setor socioeconômico na região. Enfatizando que esse manancial é fonte de abastecimento para várias comunidades rurais instaladas ao longo do percurso.

4.2 ETAPAS METODOLÓGICAS DA PESQUISA

Para elaboração desta pesquisa, foram realizadas buscas em fontes bibliográficas de livros e revistas científicas, além dos *softwares* Google Earth Pró e QGIS na versão 3.16 para elaboração de mapas temáticos. Para edição das planilhas e desenvolvimento dos gráficos foi utilizado o *software* Excel.

Está representado na Figura 5, as etapas metodológicas pertinentes aos objetivos desta pesquisa.

Figura 5 – Fluxograma conforme as etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2023).

4.3 COLETA E PREPARAÇÃO DO RESÍDUO DE CAULIM

A coleta de resíduo de caulim foi realizada em uma mineradora no município de Junco do Seridó-PB (Figura 6). Localizada as margens da BR-230, distante 144 km de Pombal-PB. A área disponibiliza um vasto volume de resíduos da mineração de caulim, alocadas em grandes pilhas.

Figura 6 – Resíduo da mineração de caulim disposto diretamente no solo



Fonte: Autoria própria (2023).

O caulim foi levado para o Laboratório de Análise de Águas da UFCG, mais precisamente no *campus* Pombal, sendo pesado e posteriormente separado em três granulometrias diferentes, através das peneiras ABNT n° 20 de 0,8 mm; n° 16 de 1,18 mm; n° 9 de 2 mm e de um agitador mecânico.

Posteriormente, o material foi colocado em uma peneira suporte e lavado com água corrente para remoção de impurezas, o método foi exercido até não ser mais observado insumo residual na água de lavagem. Continuando o procedimento, foi efetuada a desinfecção do resíduo de caulim, com o auxílio do composto químico hipoclorito de sódio a 0,5% durante 48 horas (SOUZA FREITAS; SABOGAL-PAZ, 2019). Logo após as lavagens do caulim, as amostras foram colocadas em bandejas individuais e expostas ao sol.

4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO LENTA COM RETROLAVAGEM

Para esta pesquisa foi utilizado um filtro lento que compõe um sistema de filtração lenta desenvolvido para pesquisas realizadas no Laboratório de análises de águas – Laag, UFCG, *Campus* Pombal. O sistema completo de filtração lenta conta com dois filtros lentos com meio filtrante de resíduo da mineração de caulim com diferentes granulometrias, a citar: um filtro lento de dupla camada filtrante (FL2C), no qual cada camada tinha igual espessura equivalente a 0,45 m de resíduo de caulim, enquanto os diâmetros adotados foram de 0,8 mm e 1,18 mm, nesta devida ordem.

É um filtro lento de tripla camada filtrante (FL3C), também de iguais espessuras, apresentando 0,3 m e os diâmetros foram de 0,8 mm, 1,18 mm e 2 mm, respectivamente. Composto a camada suporte, foram utilizadas três camadas de resíduo de caulim, variando entre 3 a 6 mm de diâmetros.

O sistema completo de filtração lenta é mostrado na Figura 7, nos quais pertencem às siglas dispostas para configurar cada filtro: as duas primeiras letras F e L significam “filtro lento”; os números 2 e 3 representam a quantidade de camadas em cada filtro; enquanto a letra C diz respeito ao material filtrante empregado, neste caso o “resíduo de caulim”. Os resultados apresentados nesta pesquisa correspondem ao tratamento realizado no FL3C apenas.

Figura 7 – Sistema completo de filtração lenta



Fonte: Autoria própria (2023).

Os filtros foram confeccionados com tubulações de PVC de 1,60 m de altura, diâmetro de 0,15 m, meio filtrante de 90 cm de altura, camada suporte de 20 cm de altura, calha de coleta de água de lavagem situa-se a 20 cm acima do meio filtrante e 10 cm de borda livre. O sistema de drenagem dos filtros foi composto por 2 crepinas cônicas e um fundo falso, foram instaladas 2 torneiras comuns para saída de água tratada, 2 rotômetros (Figura 8) para controle da vazão, 9 registros de esfera, 1 motor elétrico monofásico 1/2 CV (Figura 8), 1 painel que consta marcação

de altura e mangueiras a serem acopladas no painel. O sistema conta ainda com um reservatório elevado com capacidade para 100 litros (Figura 8), instalado em uma base de madeira a 2,35 m do solo e um reservatório apoiado com capacidade para armazenamento de 150 litros de água para lavagem.

4.2.1 Retrolavagem

A retrolavagem foi realizada através do bombeamento de boa performance vertical, onde a água era direcionada aos filtros por uma entrada na parte inferior, passando por toda a estrutura do sistema de tratamento, transportando as impurezas para fora dos filtros, por meio da calha de coleta e extravasor.

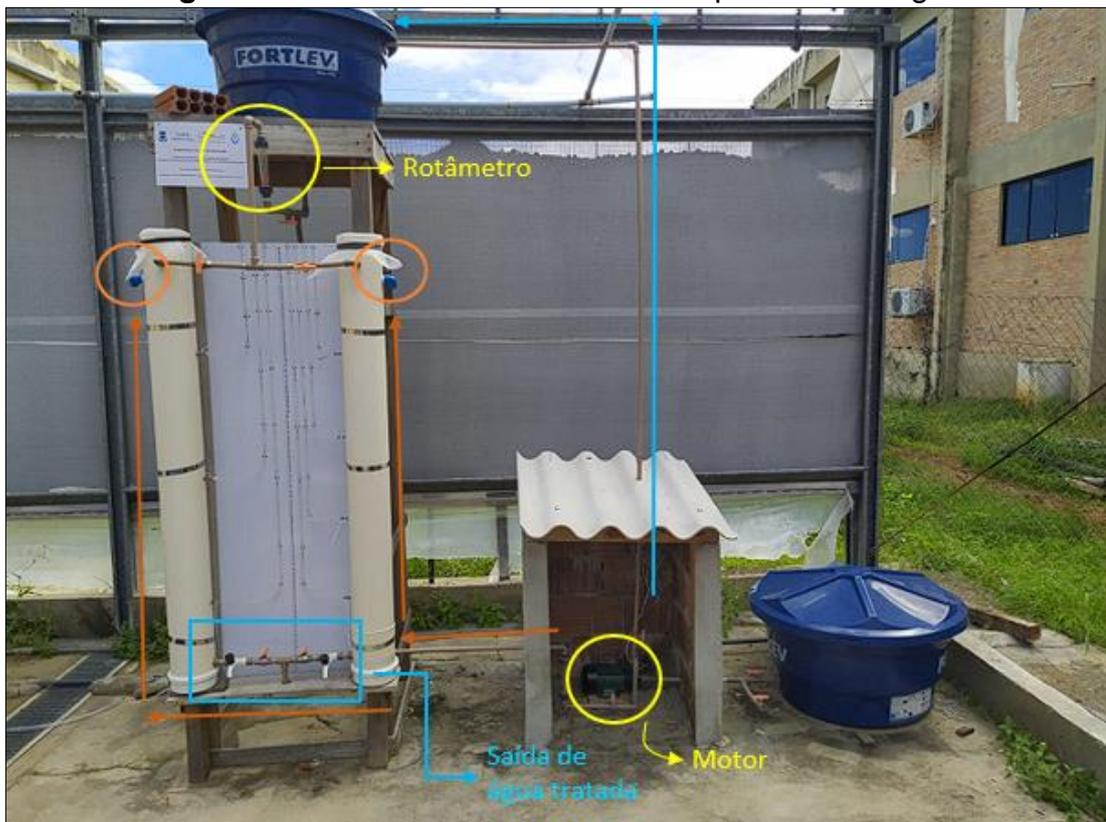
Esse procedimento foi feito a partir do momento em que foi observado uma redução na eficiência de remoção dos parâmetros físicos, químicos e biológicos, não filtrando a água da maneira esperada. Logo, fecharam-se os registros necessários para a água fazer o processo inverso (fluxo ascendente), controlando a vazão de 284 L/h no rotâmetro, a fim de evitar perda do material filtrante. O tempo de duração deste processo foi de 10 minutos.

4.5 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO LENTA

A água era coletada no rio Piranhas uma vez por semana, armazenada em caixas d'água e bombeada para o reservatório superior por meio do conjunto motor-bomba, sendo necessário desligar o equipamento antes do completo esvaziamento do reservatório rente ao chão, para evitar a entrada de ar na tubulação.

A operação do filtro ocorria diariamente, de segunda-feira à sexta-feira, da seguinte maneira: abria-se o registro de liberação da água armazenada no reservatório elevado, sempre controlando a vazão em 8 L/h através do rotâmetro. Quando o nível de água estivesse em 130 cm de altura (observado no painel), sessava-se a entrada de água e esperava ocorrer o tratamento em regime intermitente, conforme o período de pausa. A saída de água tratada é na parte inferior dos filtros, por meio das torneiras. Está representado na Figura 8 o funcionamento do tratamento empregado.

Figura 8 – Funcionamento dos filtros e percurso da água



Fonte: Autoria própria (2023).

Quando o conjunto motor-bomba é acionado (circulado na cor amarela na parte inferior do sistema), a água faz o percurso conforme as setas azuis apontadas para cima e esquerda respectivamente; enquanto a coleta de água tratada após a filtração e período de pausa, é através das torneiras circuladas também na cor azul; quando necessário fazer a retrolavagem do sistema de filtração lenta, ajusta os registros para que a água passe através dos dois filtros por meio de uma tubulação que os interligam, fazendo a trajetória conforme as setas laranjas; a água utilizada na retrolavagem é descartada por meio do extravasor, circulado em laranja; para a operação do sistema ocorrer de maneira satisfatória, é de crucial importância controlar a vazão de entrada de água nos filtros, até mesmo a vazão para a retrolavagem, para isso, utiliza-se os rotâmetros circulados na cor amarela;

A água bruta utilizada nos filtros lentos é do tipo superficial, sendo tratada em um período de pausa de 6 horas (NAPOTNIK *et al.*, 2021). Os filtros operaram de maneira regular por um período de 90 dias, entre os meses de junho a setembro de 2022. No decorrer do experimento, a eficiência do tratamento foi avaliada por meio de comparativos dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água bruta e filtrada.

4.6 ANÁLISES DE ÁGUA BRUTA E TRATADA

Foram coletadas amostras de água bruta e tratada, no qual as análises foram realizadas em triplicatas, utilizando os parâmetros físico-químicos, cor aparente, turbidez, pH e condutividade elétrica; e parâmetros microbiológicos, coliformes totais e *E. coli*. A coleta de água bruta era realizada antes da alimentação do filtro, às 8 horas da manhã, e a coleta de água tratada, após o período de pausa de 6 horas, às 14 horas.

O Quadro 1 logo abaixo, define quais os parâmetros, métodos, equipamentos e frequências que foram realizadas as análises de água.

Quadro 1 – Análise de água bruta e tratada

Parâmetro	Método	Equipamento	Frequência
pH	Potenciométrico	Medidor de pH digital MS TECNOPON (Modelo mPA-210)	Diária
Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Eletrômetro	Condutivímetro digital Tecnal (Modelo Tec-04-MP)	Diária
Turbidez (NTU)	Nefelometria	Turbidímetro Policontrol (Modelo AP2000 iR)	Diária
Cor aparente (uH)	Colorimétrico	Colorímetro digital Lovibond (Modelo PCcheckit)	Diária
Coliformes totais (UFC 100 mL^{-1})	Membrana filtrante	Levine Agar (E.M.B)	Semanal
Escherichia coli (UFC 100 mL^{-1})	Membrana filtrante	Levine Agar (E.M.B)	Semanal

Fonte: Autoria própria (2023).

*As nomenclaturas entre parênteses representam a unidade de medida do parâmetro.

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados obtidos foram avaliados mediante análise de variância pelo teste F. Nos casos de significância, foi realizado teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para as amostras de água antes e após a filtração lenta, utilizando-se do *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2019) e considerados significativos todos os p-valores $\leq 0,05$.

O teste estatístico serviu para identificar qual ou quais parâmetros tiveram remoção significativa durante o sistema de filtração lenta com resíduo de mineração de caulim. Para isso, foi feito tabelas em Excel e posteriormente copiadas para o *software* SISVAR, onde o programa faz o procedimento automaticamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta sessão foram direcionados de acordo com os objetivos específicos do trabalho, levando em consideração a eficiência do filtro lento de meio filtrante alternativo no tratamento de água de rio. As variáveis analisadas para a água bruta, coletada no rio Piranhas, e a água tratada pelo filtro lento de caulim são apresentadas, em valores médios, na Tabela 1.

Tabela 1 – Média dos resultados obtidos e p-valor

Indicador	Água bruta ± DP	Água filtrada ± DP	p-valor
pH	7,39 ± 0,11	7,22 ± 0,09	0,0015
CE	278,16 ± 3,67	273,11 ± 3,49	0,0387
Turbidez	11,59 ± 0,32	3,31 ± 0,1	0,0003
Cor aparente	60,22 ± 2,83	24,44 ± 1,5	0,0004
Col. totais	7955,56 ± 1251,94	408,19 ± 225,69	0,0005
<i>E. coli</i>	2869,17 ± 436,46	106,67 ± 56,34	0,0006

Fonte: Autoria própria (2023).

Constatou-se que o filtro lento de resíduo da mineração de caulim, em geral, melhorou a qualidade da água em relação aos parâmetros monitorados, reduzindo significativamente o valor de todos os critérios avaliados ($p < 0,05$; Tukey). As eficiências de remoção dos parâmetros condutividade elétrica, turbidez, cor aparente, coliformes totais e *E. coli* podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Eficiência de remoção e p-valor

Indicador	Eficiência de remoção ± DP	p-valor
CE	1,45 ± 2,11%	0,0387
Turbidez	58,04 ± 1,91%	0,0003
Cor aparente	49,84 ± 4,69%	0,0004
Col. totais	1,24 ± 0,01 log	0,0005
<i>E. coli</i>	1,19 ± 0,01 log	0,0006

Fonte: Autoria própria (2023).

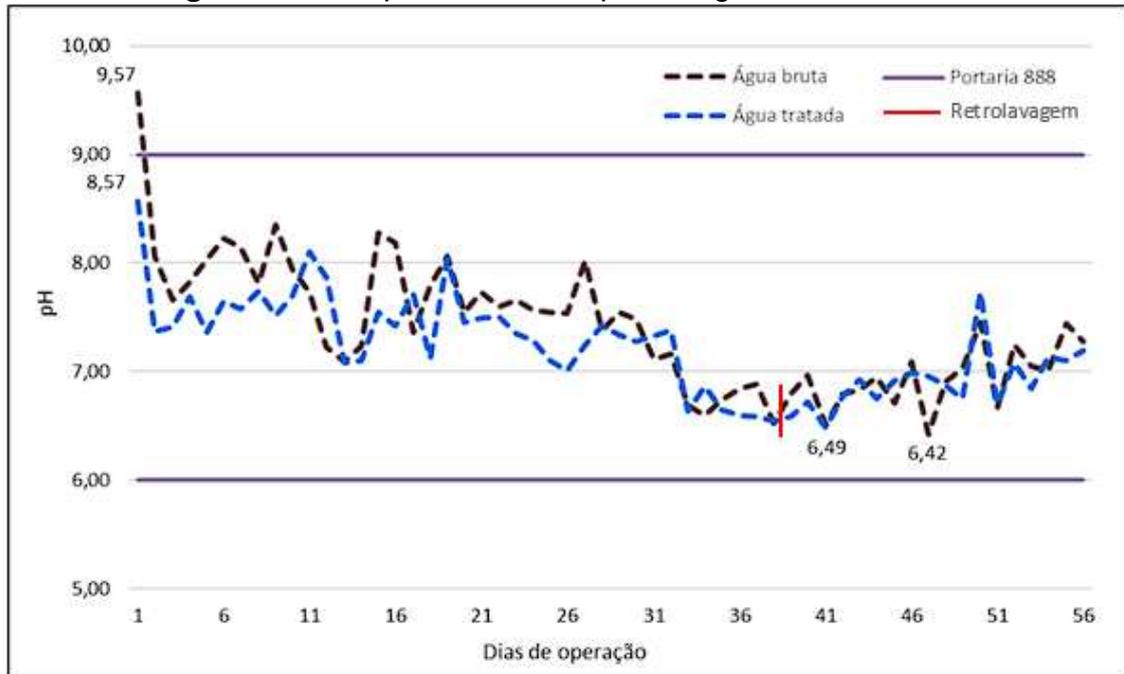
*Não existe remoção de pH, neste caso é um parâmetro de acompanhamento em que houve variação

5.1 pH

Em relação ao pH, os valores variaram de 6,42 a 9,57 para água bruta e de 6,49 a 8,57 para água filtrada durante o período de operação. Em termos médios, o pH se manteve em $7,39 \pm 0,11$ para água bruta e $7,22 \pm 0,09$ para água tratada (Tabela 1) e teve redução média de $2,14 \pm 1,05\%$ após a filtração.

O comportamento do pH durante todo o período de operação pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Comportamento do pH da água bruta e tratada



Fonte: Autoria própria (2023).

O pH teve uma linha de comportamento dentro do previsto, entre as faixas de 6,00 a 9,00 como descrito na portaria de potabilidade (PORTARIA GM/MS N°888/2021). Inclusive, mesmo após a retrolavagem, se manteve dentro dos padrões estabelecidos.

O pH é um importante parâmetro de acompanhamento para entender melhor o comportamento da filtração, quando por exemplo, há um aumento significativo de pH, acredita-se que um dos prováveis motivos é a lixiviação de carbono de cálcio em filtros de concreto (MURPHY, MCBEAN E FARAHBAKSH, 2010), lixiviação do material filtrante em filtros de PVC (YOUNG-ROJANSCHI; MADRAMOOTOO, 2015), degradação de ácidos orgânicos e fúlvicos por atividade microbiana e também por formação de carbonato (FREITAS, 2021).

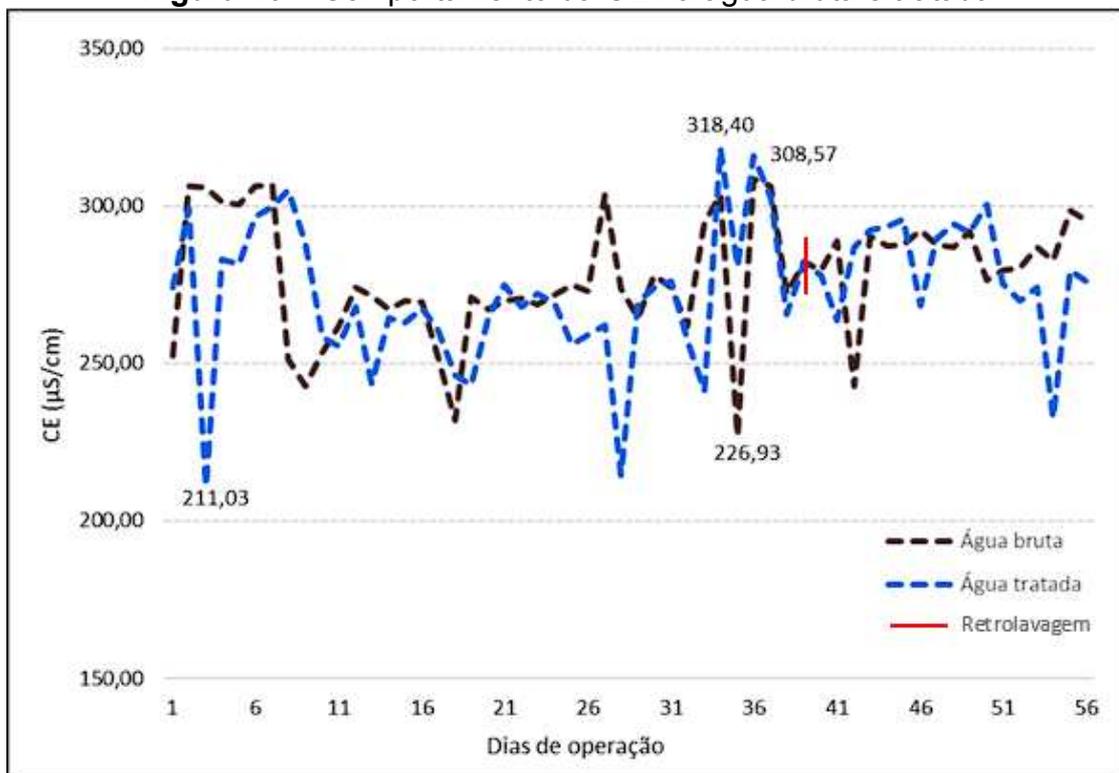
A redução do pH encontrada neste estudo foi bem próxima dos valores obtidos em outros trabalhos, a exemplo de $1,73 \pm 2,08\%$ em filtro de areia (FREITAS, 2021); $1,8 \pm 2,1\%$ (TERIN, 2021). Neste estudo, infere-se não ter ocorrido uma interferência física, química ou biológica que alterasse o pH ao ponto de ficar fora dos valores da portaria de potabilidade da água.

5.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Em relação a condutividade elétrica (CE), os valores variaram de 226,93 a 308,57 μScm^{-1} para água bruta e de 211,03 a 318,40 μScm^{-1} para água filtrada durante o período de operação. Tratando-se de valores médios, a CE se manteve em $278,16 \pm 3,67 \mu\text{Scm}^{-1}$ para água bruta e $273,11 \pm 3,49 \mu\text{Scm}^{-1}$ para água tratada (Tabela 1) e eficiência de remoção $1,45 \pm 2,11\%$ (Tabela 2).

O comportamento da condutividade elétrica durante todo o período de operação pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Comportamento da CE na água bruta e tratada



Fonte: Autoria própria (2023).

A condutividade elétrica se condicionou entre as faixas 214,47 a 318,40 μScm^{-1} , não apresentando riscos ao sistema de tratamento, as conexões de água e à saúde humana. Ainda que, a portaria de potabilidade da água não estabelece valores máximos e mínimos para este parâmetro.

Segundo Lima (2020), a condutividade elétrica é um parâmetro que auxilia no entendimento do comportamento do filtro, não implicando na eficiência do

tratamento. Dito isso, esse parâmetro está mais associado a quantidade de íons presentes na água, afetando a salinidade do afluyente.

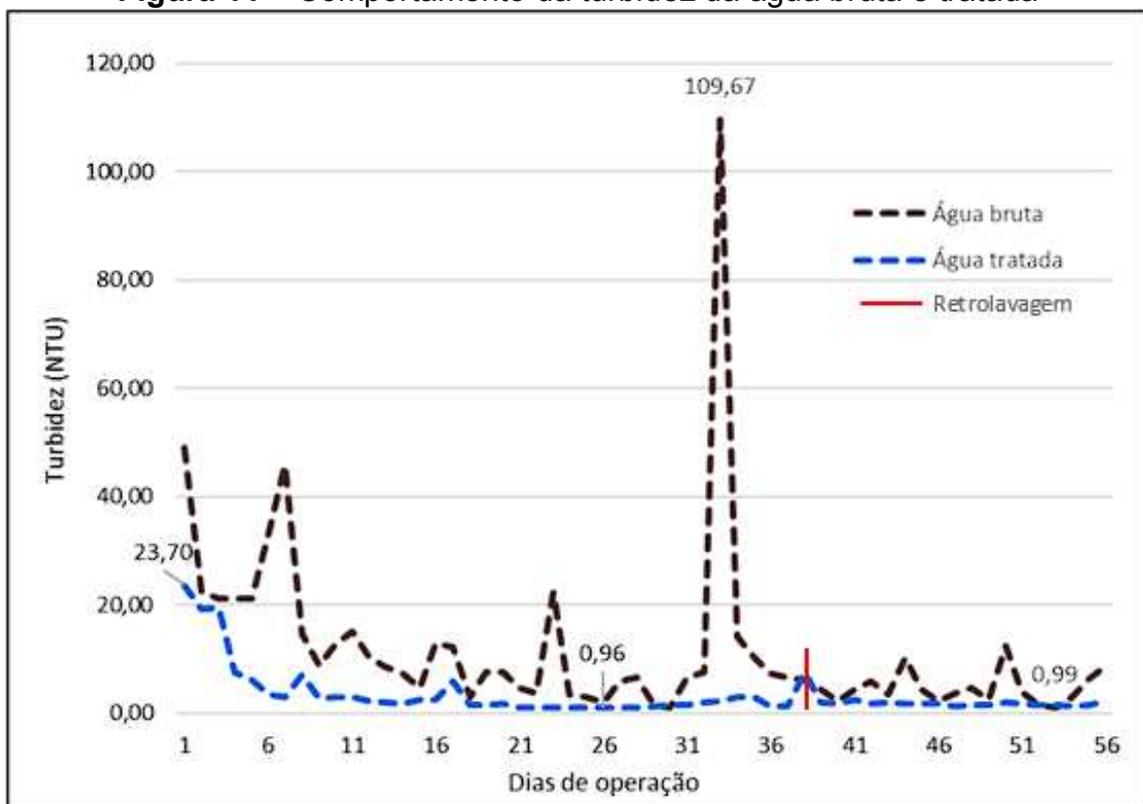
A CE está associada aos sólidos totais dissolvidos (STD), no qual é responsável por causar incrustamento na tubulação, pode ocasionar sabor à água e quando acumulado no organismo pode suceder ao aparecimento de cálculos renais (SANTOS; MOHR, 2013).

5.3 TURBIDEZ

No que se refere a turbidez, os valores variaram de 0,99 a 109,67 NTU para água bruta e de 0,96 a 23,70 NTU para água filtrada durante o período de operação. A média da turbidez permaneceu em $11,59 \pm 0,32$ NTU para água bruta e $3,31 \pm 0,1$ NTU para água tratada (Tabela 1) e eficiência de remoção de $58,04 \pm 1,91\%$ (Tabela 2).

O comportamento da turbidez durante todo o período de operação pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Comportamento da turbidez da água bruta e tratada



Fonte: Autoria própria (2023).

A turbidez teve um valor médio de 11,59 NTU para água bruta, mas como é possível observar no gráfico (Figura 11), teve dias em que houve picos elevados de turbidez, principalmente nos 7 primeiros dias de operação, atingindo 49,17 NTU, dia 23 (22,33 NTU) e dia 33 (109,67 NTU). Tudo isso implica em uma maior dificuldade de remoção de turbidez através do sistema de filtração lenta.

Enquanto os valores obtidos de turbidez na água tratada, foram insatisfatórios nos 3 primeiros dias de operação, chegando a picos de 23,70 NTU. Porém, esse comportamento é esperado, pois a camada biológica ainda não estava formada. (TERIN e SABOGAL-PAZ, 2019)

A partir do dia 9, nota-se uma constância em relação aos valores obtidos, onde a turbidez teve um comportamento entre 0,96 à 5,88 NTU até o dia 37. Ressaltando o dia 26 (0,96 NTU), no qual sugere-se que à melhoria na redução de turbidez pode estar associado ao melhor desenvolvimento da camada biológica.

No dia 33 de operação do filtro, a água bruta chegou ao valor máximo de 109,67 NTU, enquanto na água tratada foi obtido 2,26 NTU, com a maior eficiência de remoção registrada durante o período de operação (97,94%). Isso só é possível devido a completa formação da camada biológica. (TERIN *et al.*, 2021)

Após a retrolavagem do filtro lento, a turbidez obteve um valor de 7,56 NTU, isso ocorre porque a camada biológica pode ter sido comprometida através do funcionamento da retrolavagem. Todavia, após o primeiro dia de análise posterior ao sistema de lavagem do filtro, a turbidez começou a diminuir como esperado, com eficiência de remoção entre 12,70% a 83,78%.

Com valores satisfatórios quanto a granulometria empregada, a turbidez da água filtrada obteve valores abaixo de 5 NTU em 85,71% dos dias de operação, no entanto, apenas o dia 26 apresentou valor abaixo do VMP 1 NTU conforme a PORTARIA GM/MS nº888 (2021). Com isso, a implantação de medidas de pré-tratamento, como a utilização de mantas sintéticas e sistemas de decantação, podem ser alternativas para a melhoria da remoção de turbidez em filtros lentos de caulim (GARCIA *et al.*, 2022).

A remoção de turbidez de FL3C foi menor que em alguns filtros lentos apresentados em outras pesquisas. A exemplo dos filtros contínuos de areia estudados por FREITAS *et al.* (2021) que alcançaram a eficiência de $73 \pm 20\%$. Outro exemplo, é a eficiência de remoção de 73% do filtro lento de areia avaliado por GARCIA *et al.* (2022). Este resultado pode estar relacionado às diferenças entre

as granulometrias do resíduo da mineração de caulim empregado neste estudo e das areias empregadas pelos autores.

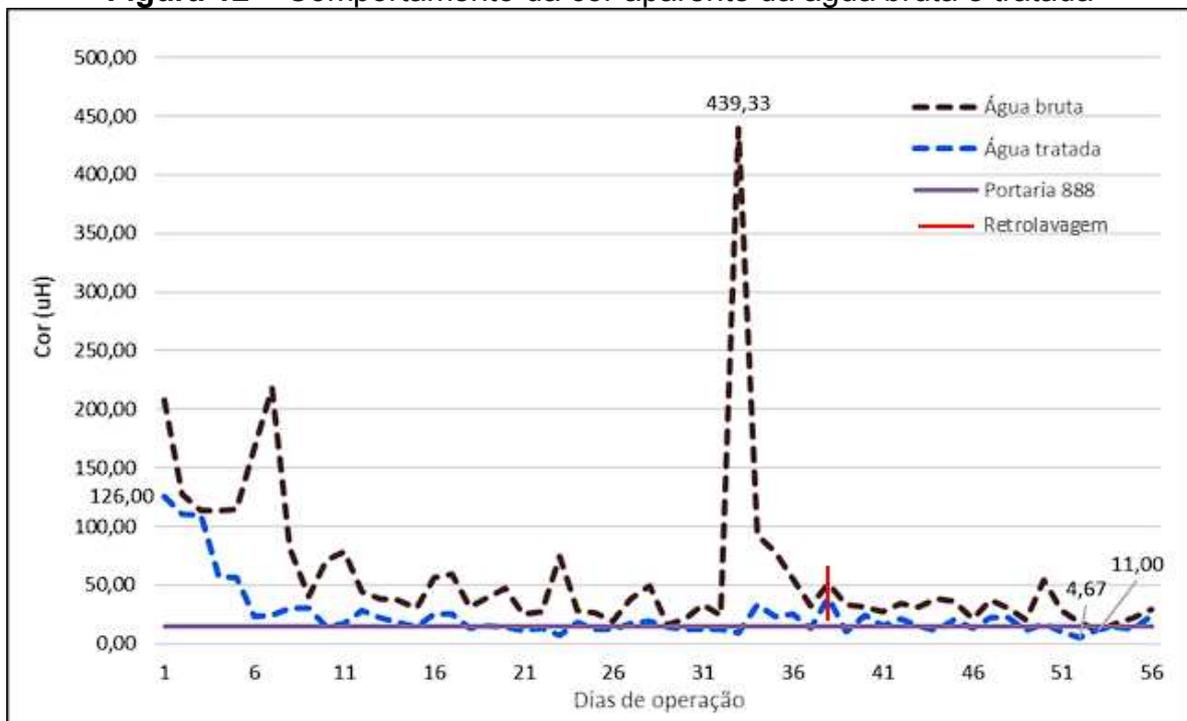
Albuquerque *et al.* (2019) ao avaliar um sistema de filtração lenta com areia, complementado com coagulação, floculação e sedimentação como pré-tratamento e sistema de retrolavagem, encontrou resultados que demonstraram eficiência na remoção de turbidez de 98,00% e média de 0,8 NTU nas amostras de água filtrada.

5.4 COR APARENTE

A respeito da cor aparente, os valores variaram de 11,00 a 439,33 uH para água bruta e de 4,67 a 126,00 uH para água filtrada durante o período de operação. Onde este mesmo parâmetro obteve média de $60,22 \pm 2,83$ uH para água bruta e $24,44 \pm 1,5$ uH para água tratada (Tabela 1) e eficiência de remoção $49,84 \pm 4,69\%$ (Tabela 2).

O comportamento da cor durante todo o período de operação pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Comportamento da cor aparente da água bruta e tratada



Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados do FL3C mostraram que apenas 44,64% dos dias de operação, apresentaram água com valores abaixo de 15 uH (VMP na portaria de potabilidade; PORTARIA GM/MS N°888/2021).

A cor aparente da água bruta teve picos acima de 15 uH em 98,21% dos dias de operação, enfatizando o dia 33 com 439,33 uH. Vale ressaltar, a eficiência do filtro lento nesse mesmo dia, no qual teve eficiência de 97,88%, reduzindo a cor para 9,33 uH. Contudo, a eficiência média do filtro durante o período de operação (49,84%) foi abaixo do esperado, podendo ser observado da figura 8, onde a linha azul (água tratada) está acima da linha roxa (VMP) na maioria dos dias.

Ainda assim, o comportamento da cor aparente ao longo do tempo ficou próximo ao VMP, oscilando ligeiramente para mais ou menos. Logo, acredita-se que o motivo dessa oscilação na cor aparente, é devido a granulometria mais grossa do meio filtrante empregada no filtro lento, dando margens de estudos a outras possíveis granulometrias mais finas do resíduo de caulim.

A remoção da cor aparente de FL3C foi menor que alguns trabalhos de outros estudos, a exemplo de $73,4 \pm 28,5\%$ filtro contínuo (LAMON, 2020) com meio filtrante de areia média, areia grossa, pedregulho fino e pedregulho grosso; $72,8 \pm 24,4\%$ filtro intermitente (LAMON 2020), com estrutura similar ao filtro contínuo do mesmo trabalho e autor.

Outro comparativo que vale citar, são os filtros lentos domiciliares intermitentes de Terin (2021), construídos de areia fina e grossa, pedregulho fino e grosso, sendo o primeiro deles constituído com um difusor, de eficiência de remoção da cor ($71,7 \pm 18,6\%$) e o outro filtro com uma boia, de eficiência ($73,2 \pm 19,7\%$), no entanto, é importante frisar que houve um pré-tratamento da água, com desinfecção por meio de hipoclorito de sódio (NaClO).

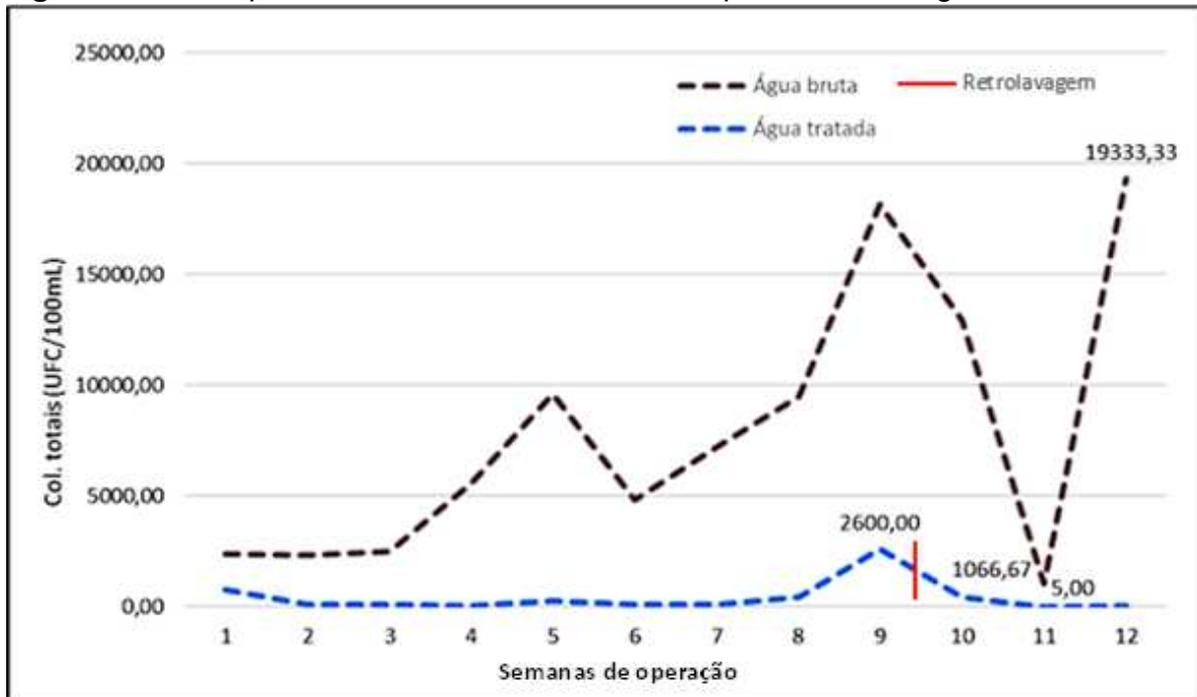
5.5 COLIFORMES TOTAIS

No que diz respeito aos coliformes totais, os valores variaram de 1066,67 a 19333,33 UFC/100mL para água bruta e de 5,00 a 2600,00 UFC/100mL para água filtrada durante o período de operação.

Em termos médios, os coliformes totais se mantiveram em $7955,56 \pm 1251,94$ UFC/100mL para água bruta e $408,19 \pm 225,69$ UFC/100mL para água tratada (Tabela 1) e eficiência de remoção $1,24 \pm 0,01$ log (94,28%) (Tabela 2).

O comportamento dos coliformes totais durante todo o período de operação pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Comportamento dos coliformes totais presentes na água bruta e tratada



Fonte: Autoria própria (2023).

Os coliformes totais presentes na água bruta tiveram um valor médio de $7955,56 \pm 1251,94$ UFC/100mL, com elevados números em todas as semanas de análises, chegando a valores próximos a 20.000,00 UFC/100mL como mostrado no gráfico (Figura 13). Contudo, observando a linha de comportamento dos coliformes totais na água tratada, houve redução em todas as semanas de operação, onde algumas semanas a eficiência ultrapassou de 2 log (99,00%).

Logo abaixo (Tabela 3) é possível notar a quantidade de coliformes totais na água bruta e tratada em UFC/100mL, e também a eficiência de remoção.

Tabela 3 – Valores de coliformes totais e eficiência de remoção (continua)

Semanas	Água b (UFC/100mL)	Água trat (UFC/100mL)	Ef. remoção
1	2400,00	766,67	0,49 log (68,06%)
2	2333,33	116,67	1,30 log (95,00%)
3	2466,67	76,67	1,51 log (96,89%)
4	5600,00	23,33	2,38 log (99,58%)
5	9600,00	253,33	1,58 log (97,36%)
6	4833,33	80,00	1,78 log (98,34%)
7	7233,33	76,67	1,97 log (98,94%)
8	9500,00	413,33	1,36 log (95,65%)

Tabela 3 – Valores de coliformes totais e eficiência de remoção (conclusão)

Semanas	Água b (UFC/100mL)	Água trat (UFC/100mL)	Ef. remoção
9	18166,67	2600,00	0,84 log (85,69%)
retrolavagem	-	-	-
10	12933,33	443,33	1,46 log (96,57%)
11	1066,67	5,00	2,33 log (99,53%)
12	19333,33	43,33	2,65 log (99,78%)

Fonte: Autoria própria (2023).

*Água b: significa água bruta;

*Água trat: significa água tratada;

*Ef. Remoção: significa eficiência de remoção.

Como é possível observar (Tabela 3), a análise realizada na primeira semana de operação, no qual a camada microbiológica ainda não estava completamente desenvolvida, a eficiência de remoção dos coliformes totais foi de apenas 0,49 log. No entanto, após uma semana, onde foi possível notar um melhor desenvolvimento da camada biológica, a eficiência de remoção já alcançou níveis satisfatórios acima de 1,3 log (95,00%).

É importante atentar-se a semana 9, no qual a eficiência de remoção dos coliformes totais baixou para 0,84 log, demonstrando que a eficiência do filtro foi comprometida e que foi necessário realizar a retrolavagem. Acredita-se que o motivo da diminuição da eficiência no tratamento, pode ser devido ao acúmulo de partículas que obstrui os poros do filtro reduzindo a capacidade de filtração (LUNARDI, 2021).

Após a retrolavagem do filtro lento, foi determinado que não haveria análise microbiológica, pois fica subentendido a baixa eficiência de remoção de patógenos na ausência da camada biológica (THOMAS, 2022). Portanto, após uma semana de desenvolvimento da camada microbiológica, foi possível notar aumento de 0,84 log para 1,46 log, 2,33 log e 2,65 log nas semanas 9, 10, 11 e 12 respectivamente.

A eficiência de remoção dos coliformes totais do FL3C foi bastante satisfatória, em comparativo com o trabalho de Garcia *et al.* (2022), onde o autor utilizou um pré-tratamento através da sedimentação em um reservatório elevado por 24 horas, filtração por membrana, filtração lenta com leito filtrante de areia de jardinagem e desinfecção por meio de dispositivo UV Mesita Azul, alcançando eficiência de remoção 3,88 log. Mas como é possível perceber, teve todo um trabalho mais específico para conseguir esses valores, enquanto o presente trabalho feito apenas com filtração lenta, tendo remoção média acima de 90,00%.

Por sua vez, Andreoli e Sabogal-Paz (2020) avaliaram filtros lentos de areia para tratamento de águas subterrâneas, de fluxo contínuo e outro intermitente,

ambos cobertos por manta sintética, além de um pós tratamento com hipoclorito de sódio a 2%, e encontraram eficiências de remoção de coliformes totais de 3,5 log para os filtros contínuos e 1,5 log para os intermitentes.

Com isso, é possível perceber que o filtro lento deste presente trabalho, obteve resultados semelhantes ao filtro intermitente de Andreoli (2020), no entanto, o filtro contínuo do mesmo autor obteve respostas bem mais eficientes.

Mohammed e Solumon (2022) construíram dois filtros lentos, o primeiro com 40 cm de areia fina e o segundo com 20 cm de areia fina e 20 cm de areia grossa. Onde o filtro com apenas um tipo de granulometria variou de 1,7 a 1,9 log na remoção de coliformes totais, enquanto o segundo filtro atingiu 1,1 a 1,2 log de eficiência. Logo, constata-se que ambos tiveram eficiência similares ao filtro lento em questão, com resíduo de mineração de caulim como meio filtrante alternativo.

Portanto, é possível observar que a redução dos coliformes totais no filtro lento, teve resultados satisfatórios, tendo como base literaturas já consolidadas. Onde nota-se eficiência de remoção acima dos 90% em 83,33% das análises realizadas durante os dias de operação, mesmo sem um sistema de pré-tratamento ou desinfecção.

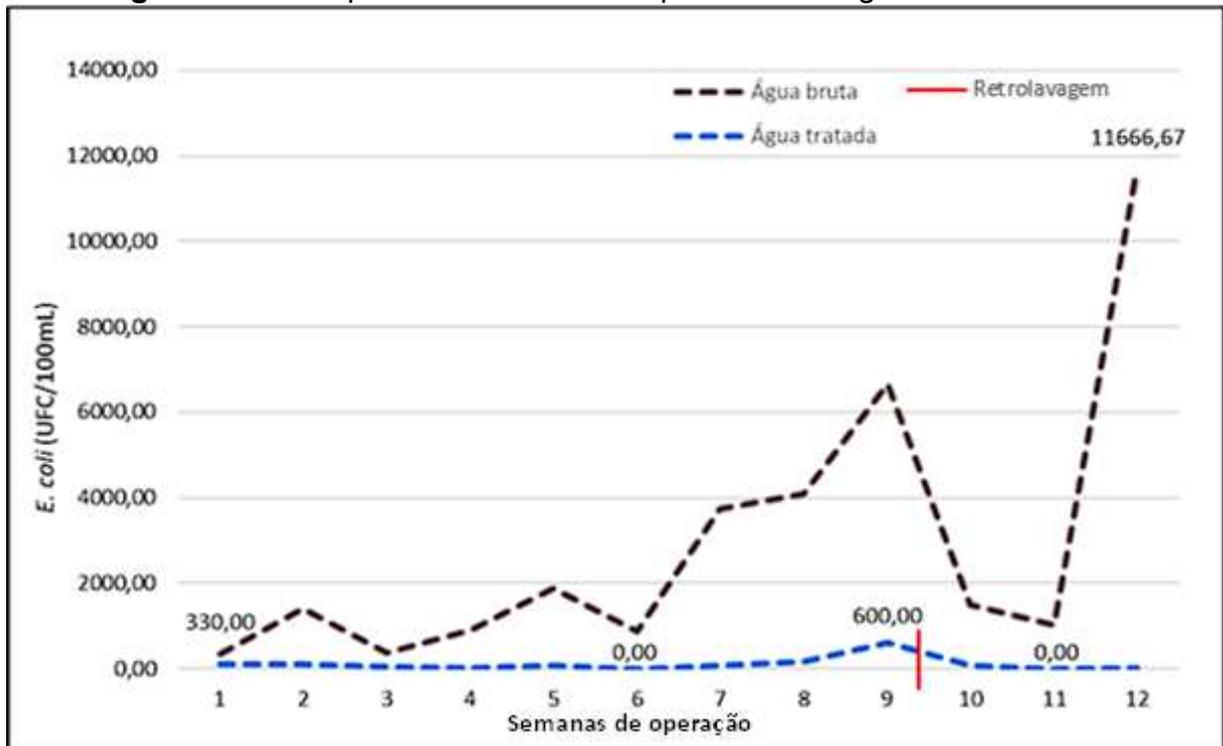
5.6 ESCHERICHIA COLI

No que concerne a *E. coli*, os valores variaram de 330,00 a 11666,67 UFC/100mL para água bruta e de 0,00 a 600,00 UFC/100mL para água filtrada durante o período de operação.

Os resultados mostraram que a *E. coli* permaneceu, em média, 2869,17 UFC/100mL para água bruta e 106,67 UFC/100mL para água tratada (Tabela 1) e eficiência de remoção $1,19 \pm 0,36$ log (93,55%) (Tabela 2).

O comportamento da *E. coli* durante todo o período de operação pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Comportamento da *E. coli* presente na água bruta e tratada



Fonte: Autoria própria (2023).

A *E. coli* presente na água bruta teve um valor médio de 2869,17 UFC/100mL, com elevados picos em praticamente todas as semanas de análises como demonstrado no gráfico (Figura 14), enquanto na água tratada, houve remoção/redução em todas as semanas de operação. A Tabela 4 representa os valores obtidos durante as 12 semanas de análises.

Tabela 4 – Valores encontrados de *E. coli*

Semanas	Água bruta (UFC/100mL)	Água tratada (UFC/100mL)
1	330,00	116,67
2	1400,00	103,33
3	366,67	33,33
4	900,00	6,67
5	1866,67	73,33
6	866,67	0,00
7	3733,33	73,33
8	4100,00	160,00
9	6666,67	600,00
retrolavagem	-	-
10	1500,00	86,67
11	1033,33	0,00
12	11666,67	26,67

Fonte: Autoria própria (2023).

*O símbolo entre parênteses (-) representa a semana que houve retrolavagem.

Como é possível observar (Tabela 4), os resultados obtidos das primeiras 5 semanas de análises microbiológicas, não estão em acordo com a portaria de potabilidade da água, no qual diz que *E. coli* deve estar ausente em 100 mL (PORTARIA GM/MS N°888/2021).

Enquanto a semana 6 de operação do filtro lento, apresentou ausência de *E. coli* na análise da água tratada, com resultados satisfatórios. E posteriormente nas semanas 7 a 9, os resultados voltaram a apresentar valores significativos de *E. coli*.

Entretanto, na semana seguinte foi realizado a retrolavagem do filtro lento, no qual é removido as impurezas que diminuem a eficiência do filtro, juntamente com a camada biológica. Com isso, não foi realizada análise microbiológica nesse intervalo de tempo.

E como era esperado, foi possível notar a presença de *E. coli* na semana seguinte a retrolavagem, devido a camada biológica ainda está em amadurecimento. E como prova disto, na semana 11, não houve presença de *E. coli* na água tratada, pois a camada microbiológica já estava em completa formação.

Contudo, é possível observar que a redução da *E. coli* no filtro lento de caulim como meio filtrante alternativo, saiu como esperado. com eficiência acima de 1 log (90,00%) em 91,66% das análises feitas durante o período de operação.

A eficiência de remoção de *E. coli* do FL3C foi bem próximo de alguns filtros lentos de areia estudados em outros trabalhos. A exemplo do filtro com modelo tradicional de areia fina e o filtro compacto, diferindo apenas na profundidade e altura total, produzidos por Freitas *et al.* (2021), tendo eficiência média de remoção de *E. coli* $2,06 \pm 0,60$ log e $1,99 \pm 0,66$ log respectivamente. Ressaltando que, ambos os filtros tiveram pré-tratamento com hipoclorito de sódio, induzindo uma melhor eficiência na remoção de bactérias.

Vale mencionar, os filtros de fluxo contínuo e intermitente (ANDREOLI e SABOGAL-PAZ, 2020), com meio filtrante de areia proveniente da construção civil, lavado com água de poço, peneirado e secado ao sol. Inferindo redução acerca de 3 log para o filtro contínuo, resultado bastante satisfatório, enquanto o filtro intermitente teve redução de quase 1,5 log e após o amadurecimento da camada biológica atingiu valores próximos de 2 log. Lembrando que, assim como o trabalho de Freitas *et al.* (2021), Andreoli e Sabogal-Paz também usaram hipoclorito de sódio no pré-tratamento. Enquanto neste presente estudo, foi utilizado apenas a filtração lenta como sistema de tratamento de água.

Terin *et al.* (2021), avaliou dois modelos de filtros lentos intermitentes, construídos de PVC e areia fina como meio filtrante, coletadas em centros de jardinagens. O filtro lento com difusor, teve eficiência média de remoção de $1,5 \pm 0,7$ log, enquanto o filtro lento com válvula de boia, obteve remoção média de $1,7 \pm 0,8$ log. Com isso, é possível perceber que o presente estudo teve eficiência de redução de *E. coli* próximo ao trabalho citado, com $1,19 \pm 0,36$ log. Ainda que Terin *et al.* (2021) afirma ter utilizado um pré-tratamento de sedimentação por 24 horas, logo depois, a água passou por duas camadas de tecido sintético e não sintético, melhorando a eficiência de remoção da *E. coli*.

Os resultados sugerem uma etapa de pré-tratamento para redução de *E. coli*, devido a presença de bactérias em 10 entre as 12 semanas de análises da água, equivalente a 83,33%. Uma alternativa viável, é a desinfecção por meio de hipoclorito de sódio, utilizado nos experimentos já citados (TERIN, 2021; FREITAS *et al.*, 2021; ANDREOLI e SABOGAL-PAZ, 2020).

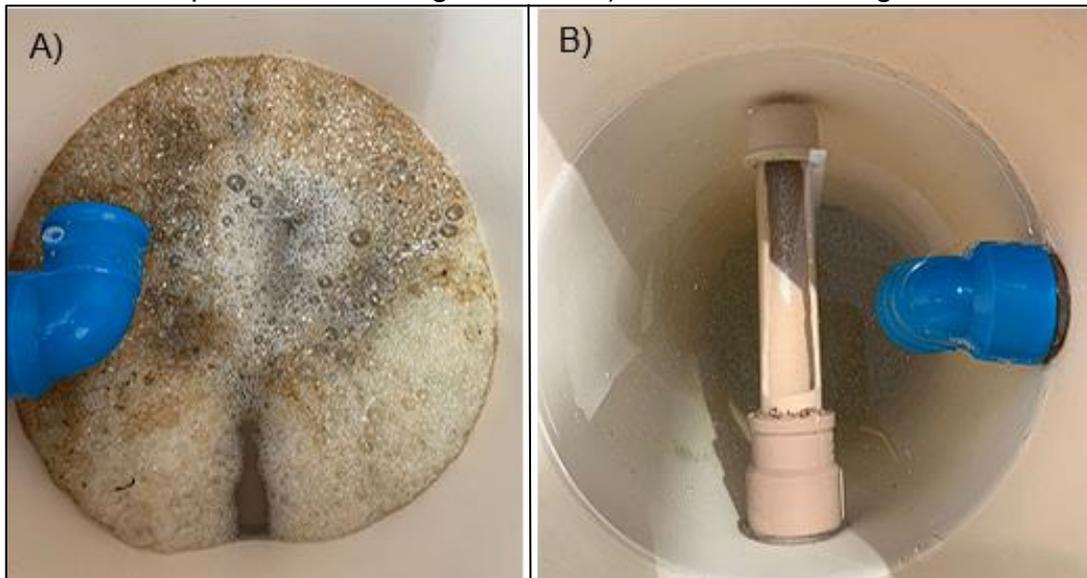
5.7 RETROLAVAGEM E CARREIRA DE FILTRAÇÃO

O FL3C apresentou uma diminuição significativa na eficiência a partir do dia 37 e 38 de operação do filtro, em outros termos, após a semana 8 conforme os gráficos da figura 13 e 14. Com isso, foi decidido prosseguir com a limpeza do sistema, a fim de melhorar a remoção da turbidez, cor aparente e demais patógenos encontrados na água.

Segundo Worma (2018) e Pizzolatti (2014), quando utilizado o método de filtração lenta, a carreira de filtração é prolongada em comparação à filtração rápida. Com isso, a carreira de filtração do FL3C foi de 62 dias, visto que o filtro operou por esse período de tempo sem a necessidade de limpeza ou retrolavagem.

Para a limpeza do sistema, foi necessário apenas o manuseio de alguns registros e ligar o motor-bomba, demonstrando ser uma alternativa prática e rápida. No qual foi utilizado 10 minutos para a completa limpeza do filtro lento, sendo demonstrado na Figura 15.

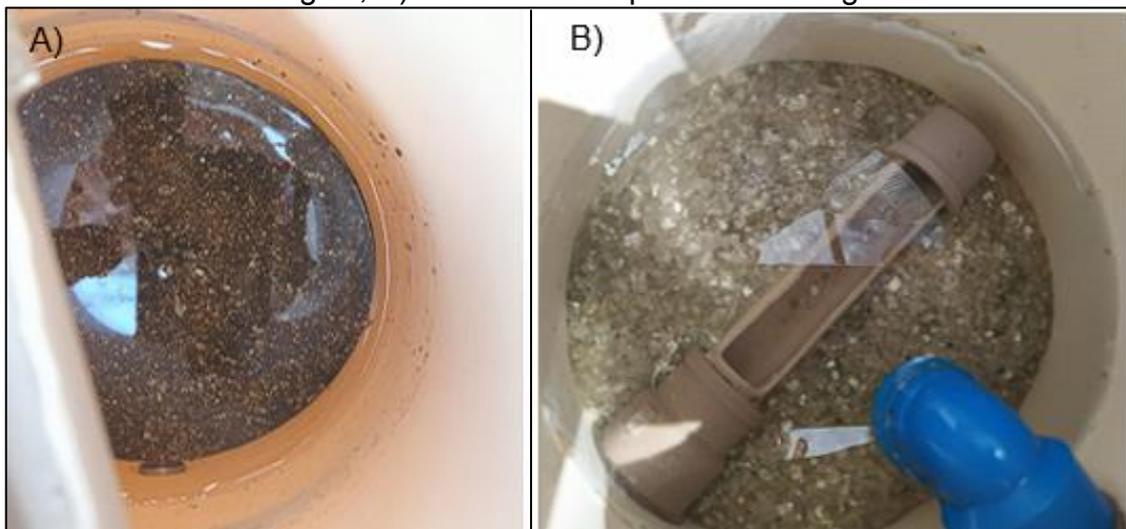
Figura 15 – Retrolavagem do FL3C: A) Início da retrolavagem com bastante impurezas e microrganismos; B) Final da retrolavagem



Fonte: Autoria própria (2023).

Como já mencionado na metodologia, a água remove as impurezas contidas no filtro lento, incluindo a camada biológica, para a calha de coleta e posteriormente é desviado para fora do sistema através do extravasor. No que concerne à maturação da camada microbiológica (Figura 16A) e conseguinte material filtrante após o processo de retrolavagem (Figura 16B e 15B), é possível notar eficiência na limpeza do filtro e remoção da camada biológica.

Figura 16 – Eficiência da retrolavagem: A) Desenvolvimento completo da camada biológica; B) Leito filtrante após a retrolavagem



Fonte: Autoria própria (2023).

Como apresentado na Figura 16A, é possível perceber uma tonalidade mais escura do meio filtrante, retratando a completa formação da camada biológica anterior à retrolavagem. Enquanto na Figura 16B, constata-se o meio filtrante, sem a presença da camada biológica.

Nota-se a completa remoção de impurezas presentes no sistema de filtração lenta através da retrolavagem, em um período de 10 minutos, apresentando ser um método eficiente quanto a limpeza do filtro lento, em comparativo com a raspagem, nas condições aplicadas neste estudo.

Conforme De Souza, Pizzolatti e Sens (2021), o filtro lento pode ser operado de 1 a 6 meses até que ocorra a primeira lavagem. Dito isto, o filtro lento com resíduo da mineração de caulim (FL3C), teve resultados satisfatórios, necessitando pouco mais de 2 meses para a retrolavagem.

6 CONCLUSÕES

- O filtro lento com leito filtrante de resíduo de caulim apresentou importantes resultados no tratamento de água de rio, mostrando-se como uma alternativa promissora para o abastecimento doméstico ou para pequenas comunidades;
- Os resultados mostraram que as remoções de turbidez, cor aparente, coliformes totais e *E. coli* não atenderam aos limites estabelecidos pela portaria de potabilidade da água (PORTARIA GM/MS N°888/2021), na maior parte do período de operação;
- A presença de bactérias remanescentes em parte das amostras de água filtrada reforça a necessidade de pós-tratamento por meio de desinfecção, a exemplo do hipoclorito de sódio, bastante utilizado em outros estudos e apontados nos resultados acima, não descartando a outra possibilidade também citada, a desinfecção através de luz UV, para maior segurança sanitária;
- Em estudos futuros, sugere-se avaliar a implantação de uma unidade de pré-tratamento, como uma manta sintética ou unidade de sedimentação, visando melhorar a eficiência de tratamento da água;
- O filtro apresentou a carreira de filtração de 62 dias e o resíduo da mineração de caulim apresentou comportamento compatível com a retrolavagem;
- Por fim, destacam-se os aspectos ambientais, sociais e econômicos do emprego do resíduo de caulim como meio filtrante alternativo em filtros lentos, incentivando o reaproveitamento do resíduo e contribuindo para a sustentabilidade dessa atividade, além de contribuir com o entendimento do tratamento de água em filtros lentos com meio filtrante alternativo.

REFERÊNCIAS

1892: ECLODE EPIDEMIA DE CÓLERA EM HAMBURGO. **Deutsche Welle**, Alemanha, 13 de ago. de 2014. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/1892-eclode-epidemia-de-c%C3%B3lera-em-hamburgo/a-895988#:~:text=Em%2013%20de%20agosto%20de,de%20condi%C3%A7%C3%B5es%20higi%C3%AAnicas%20de%20Hamburgo.>> Acesso em: 13 de dez. de 2022.

Agência Nacional de Águas - ANA, 2009. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídrico do Brasil**, 2009. Brasília, 204p.

Agência Nacional de Águas – ANA, 2010. **Termos de Referência para a Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piranhas-Açu**, 2010. Brasília, 4–24p.

ALBUQUERQUE, Maria Virgínia da Conceição *et al.* Filtração lenta ascendente na remoção de cor e turbidez de água destinada ao abastecimento público. **Saneamento Ambiental**, Vol. 7, p. 1-6, 2019. Disponível em: <<http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2019/trabalhos/pdf/congestas2019-et-02-007.pdf>>. Acesso em 25 jan. 2023.

ANDREOLI, FC; SABOGAL-PAZ, LP Filtro lento de areia doméstico para tratamento de águas subterrâneas com riscos microbiológicos em comunidades rurais. **Water Research**, v. 186, p. 116352, 2020.

ANDREOLI, Fernando César. **Filtros lentos de areia em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas subterrâneas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BELLAMY, William D.; HENDRICKS, David W.; LOGSDON, Gary S. Filtração lenta de areia: influências de variáveis de processo selecionadas. **Journal American Water Works Association**, v. 77, n. 12, pág. 62-66, 1985.

BENDIXEN *et al.* Time is running out for sand: Sand and gravel are being extracted faster than they can be replaced. Monitor and manage this resource globally, urge Mette Bendixen and colleagues. **Nature**, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02042-4>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRASIL. **Portaria GM/MS nº 888, de 04 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. Brasília, DF, p. 127, ed 2, maio. 2021. Seção 1.

BRINCK, Nádia Cristina Pires. **Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento**. Orientador: Sidney Seckler Ferreira Filho. 2009. 393f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, 2009.

BURKHARD, Alain Ramon. **Utilização do rejeito do beneficiamento do caulim para ativação alcalina**. 2018. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

CALABRIA, Giovanna Dias. **Obtenção de leito filtrante à base de zeólita e vermiculita com propriedade bactericida**. Orientador: Tereza da Silva Martins. Coorientador: Mirian Chieko Shinzato. 2017. 80f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Sustentabilidade, Universidade Federal de São Paulo, 2017.

CAPONI, Natiela. **Utilização de caulim como um potencial adsorvente de baixo custo na remoção de poluentes orgânicos em soluções aquosas**. Orientador: Edson Luiz Foletto. 2017. 68f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

CAULIM: PARA QUE SERVE E APLICAÇÃO EM BORRACHA. **Brasil Minas**, Guarulhos, 02 de junho de 2021. Disponível em: <<https://brasilminas.net/caulim-para-aplicacao-em-borracha/>>. Acesso em 27 jan. de 2023.

CLEARY, Shawn A. **Tratamento de água potável sustentável para pequenas comunidades usando filtração de areia lenta em vários estágios**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade de Waterloo, Ontario, Canadá.

DA SILVA, Deisiane Elice *et al.* Análise da eficiência da filtração lenta para o tratamento de água de uma nascente situada na zona rural de Passabém–MG. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 6, p. e676184, 2018.

DE SOUSA, Lídia DA; HARIMA, Eiji; LEITE, José Yvan Pereira. Rejeito de caulim de APL de pegmatito do RN/PB–uma fonte promissora para cerâmica branca. **HOLOS**, v. 3, p. 212-222, 2007.

DE SOUZA, Fernando Hymno; PIZZOLATTI, Bruno Segalla; SENS, Maurício Luiz. Retrolavagem como alternativa operacional simples para filtros lentos de areia de pequena escala: da concepção ao estado atual da arte. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 101864, 2021.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. São Carlos – SP, Ed. LDiBe. 2008.

FERNANDES, Kendra AN *et al.* Uso de carvão ativado de endocarpo de coco no tratamento de água. **Revista da graduação**, v. 3, n. 2, 2010.

FREITAS, B.L.S. **Filtros lentos domiciliares com operação contínua como alternativa para sistemas de tratamento de águas superficiais em comunidades**

isoladas: uma avaliação comparativa para redução do leito filtrante. 2021. 216 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

FREITAS, Bárbara Luíza Souza *et al.* A critical overview of household slow sand filters for water treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 112412, 2021.

FREITAS, Bárbara Luíza Souza *et al.* Profundidade do meio filtrante e seu efeito na eficiência do filtro de areia lento doméstico em fluxo contínuo. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 112412, 2021.

FRIZZO, R. G. **Piroplasticidade em cerâmica de composição albita - feldspato potássico – caulim.** Orientador: Adriano Michael Bernardin. 2018. 101f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2018.

Galvis, G., Latorre, J., Visscher, J.T. (1998). **Multi-stage Filtration: An Innovative Water Treatment Technology.** IRC International Water and Sanitation Centre, The Hague, Netherlands, TP Series, No. 34E.

GARCIA, Lucas AT *et al.* Efficiency of a multi-barrier household system for surface water treatment combining a household slow sand filter to a Mesita Azul® ultraviolet disinfection device Mesita Azul®. **Journal of Environmental Management**, v. 321, p. 115948, 2022.

GARCIA, Lucas AT *et al.* Eficiência de um sistema doméstico multibarreira para tratamento de águas superficiais combinando um filtro de areia lento doméstico a um dispositivo de desinfecção ultravioleta Mesita Azul®. **Journal of Environmental Management**, v. 321, p. 115948, 2022.

HELLER, Léo *et al.* Desempenho da filtração lenta em areia submetida a cargas de pico de oocistos de *Cryptosporidium* sp, bactérias e sólidos: uma avaliação em instalação piloto. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 11, p. 27-38, 2006.

HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow sand filtration.** Geneva: WHO, 1974.

LAMON, Antonio Wagner. **Caracterização de biofilmes em filtros lentos domiciliares operados em fluxo contínuo e intermitente com o uso de microssensores.** Orientadora: Lyda Patricia Sabogal Paz. 2020. 338f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

LIMA, Anderson de Jesus. **Análise comparativa da eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencional e não convencionais.** Orientadora: Denise Conceição de Gois Santos Michelin. 2020. 134f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, 2020.

LUNARDI, Samuel. **Estudo de arranjo granulométrico e condições operacionais de pré-filtração seguida de filtração lenta**. Orientador: Marcus Bruno Domingues Soares. Coorientador: Raphael Corrêa Medeiros. 2021. 122f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

LUZ, Adão Benvindo da, *et al.* **Argila-caulim**. CETEM, 2008.

MACIEL, Paulo Marcos Faria. **Filtração lenta domiciliar como alternativa de tratamento de água em comunidades isoladas: eficiências com e sem controle de nível da água e aceleração do amadurecimento**. Orientador: Lyda Patricia Sabogal Paz. 2018. 273f. Tese de Doutorado – Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2018.

MOHAMMED, Mohammed OA; SOLUMON, Abdalmoiz AM. Dois modelos de filtros de areia domésticos para purificação de água em pequena escala. **Jornal Polonês de Estudos Ambientais**, v. 31, n. 3, pág. 2737-2748, 2022.

MONTE, Priscilla Matias. **Viabilidade ambiental dos resíduos de caulim como meio filtrante para filtro no tratamento de água para abastecimento/consumo humano**. Orientador: Andréa Maria Brandão Mendes de Oliveira. 2020. 50f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, 2020.

MURPHY, H. M.; MCBEAN, E. A.; FARAHBAKHS, K. Nitrification, denitrification and ammonification in point-of-use biosand filters in rural Cambodia. **Journal of Water and Health**, v. 8, n. 4, p. 803–817, 2010.

NAPOTNIK, Julie A.; BAKER, Derek; JELLISON, Kristen L. Influence of sand depth and pause period on microbial removal in traditional and modified biosand filters. **Water Research**, v. 189, p. 116577, 2021.

NASCIMENTO, Lillian Cardoso. **Otimização de massa cerâmica de caulim com a incorporação de resíduos de vidro e rocha para a produção de materiais cerâmicos**. Orientador: Raimundo Humberto Cavalcante Lima. 2019. 68f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, 2019.

NELSON, Libardi Junior. **Sistema de tratamento para águas e efluentes**. 1ª. ed. Curitiba: Contentus 2020. p. 32-37.

PFANNES, K. R. *et al.* Selective elimination of bacterial faecal indicators in the Schmutzdecke of slow sand filtration columns. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, n. 23, p. 10323–10332, 2015.

PIZZOLATTI, B. S. *et al.* Comparison of backwashing with conventional cleaning methods in slow sand filters for small-scale communities. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, n. 1, p. 1–7, 2015.

PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M.; ROMERO, L.; LUIZ SENS, M. Comparison of backwashing with conventional cleaning methods in slow sand filters for small-scale communities. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, n. January 2014, p. 1–7, jan. 2014.

Resolução CONAMA (2005). **Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA Nº 357/2005, de 17 de março de 2005**, publicada no DOU Nº 53 de 18 de março de 2005, alterada pela Resolução n.º 410/2009 e pela Resolução n.º 430/2011.

RICHTER, Carlos A. e NETTO, José M. de Azevedo. **Tratamento de água tecnologia atualizada**. 1ª ed. São Paulo: Blucher 1991. p. 254.

RN – RIO ESTRATÉGICO PARA O ABASTECIMENTO E DESENVOLVIMENTO DO RIO GRANDE DO NORTE, O PIRANHA-AÇU VEM SENDO POLUÍDO POR COMPANHIAS DE SANEAMENTO, INDÚSTRIAS, ATIVIDADES AGRÍCOLAS E PELA OCUPAÇÃO ILEGAL DE SUAS MARGENS, O QUE TAMBÉM OCORRE PARA O ASSOREAMENTO DA BACIA. **Mapa de conflitos – Fiocruz**, 26 de maio de 2015. Disponível em: <<https://bityli.com/2BjIC>>. Acesso em 17 de janeiro de 2023.

RODRIGUES, Núbia Malú Medeiros. **Tratamento de água com filtração lenta domiciliar intermitente**. Orientadora: Juliana Marques Schöntag. 2022. 78f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, RS, 2022.

SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: Análises microbiológicas e físico-químicas em águas subterrâneas. **Revista Contexto e Saúde**, v. 13, n. 24, p. 8, 2013.

SCHORR, Adriano de Souza. **Tratamento de águas e efluentes**. 1ª.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos 2022. p. 79-87.

SILVA, Daniel Viana Andrade *et al.* **Confecção de um filtro de bancada para auxílio na melhoria da qualidade da água**. Orientador: Andréa Maria Brandão Mendes de Oliveira. 2022. 44f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, 2022.

SOUZA 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**, v. 41, p. 2783-2794. 2019.

STÜPP, Aloísio Josué *et al.* **Avaliação do funcionamento de um filtro lento com retrolavagem automática para o tratamento de água de abastecimento em pequenas comunidades**. Orientador: Fernando Hymnô de Souza. 2016. 48f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

Terin, U. C. **Sistema de múltiplas etapas com filtração lenta no tratamento domiciliar de águas superficiais com risco microbiológico**. 2021. 315p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

TERIN, Ulisses Costa *et al.* Avaliação de um sistema doméstico multibarreira como alternativa ao tratamento de águas superficiais com riscos microbiológicos. **Tecnologia Ambiental**, v. 43, n. 22, pág. 3401-3413, 2022.

TERIN, Ulisses Costa; SABOGAL-PAZ, LP Microcystis aeruginosa and microcystin-LR removal by household slow sand filters operating in continuous and intermittent flows. **Water research**, v. 150, p. 29-39, 2019.

THOMAS, Juliana Bernadete. **Processo preliminar de retrolavagem em reator de leito fixo bifluxo (RLF-BF) aplicado a potabilização de água subterrânea do meio rural**. Orientador: Alcione Aparecida de Almeida Alves. Coorientador: Aline Raquel Muller Tones. 2022. 67f. TCC (Graduação) – Universidade Federal da Fronteira Sul, 2022.

TOLENTINO JUNIOR, Job. **Potencial dos depósitos de caulim halloysítico associados aos pegmatitos da região de Juiz de Fora visando o seu aproveitamento econômico**. Orientador: Luiz Carlos Bertolino. 2019. 107f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.

TRECE, Isabela Bandeira *et al.* CICLO DA ÁGUA. **Pet Floresta**, Cartilha nº2, 2020. Disponível em: <http://r1.ufrrj.br/grupospetrural/wp-content/uploads/2020/05/Cartilha-Ciclo-Hidrol%C3%B3gico-PETFLORESTA_UFRRJ.pdf>. Acesso em 27 jan. de 2023.

VALENCIA, J. A. **o y control de los procesos de clarificacion del agua**. Peru: CEPIS/OPAS, 1981.

VALENCIA, J. A. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Lima: CEPIS, 1972. v. 13

VIEIRA, Eriton Geraldo; REZENDE, Elcio Nacur. Exploração Mineral de Areia e Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado: É possível conciliar?. **Sustainability in Debate**, v. 6, n. 2, p. 171-192, 2015.

WORMA, Fernando. **Desenvolvimento de um filtro lento bifluxo com retrolavagem**. Orientador: Maurício Luiz Sens. Coorientador: Bruno Segalla Pizzolatti. 2018. 110f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

YOUNG-ROJANSCHI, C.; MADRAMOOTOO, C. Comparing the performance of biosand filters operated with multiday residence periods. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 64, n. 2, p. 157–167, 2015.