

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

VIVIANA PARADA REINA

TRATAMENTO DE ÁGUA NO PONTO DE USO POR MEIO DA ASSOCIAÇÃO DE FILTRO
BIOSAND E ADSORÇÃO COM CARVÃO DE OSSO E ALUMINA ATIVADA VISANDO A
REMOÇÃO DE MICRORGANISMOS, TURBIDEZ E FLUORETO

PORTO ALEGRE

2022

VIVIANA PARADA REINA

TRATAMENTO DE ÁGUA NO PONTO DE USO POR MEIO DA ASSOCIAÇÃO DE FILTRO
BIOSAND E ADSORÇÃO COM CARVÃO DE OSSO E ALUMINA ATIVADA VISANDO A
REMOÇÃO DE MICRORGANISMOS, TURBIDEZ E FLUORETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Orientador: Antônio Domingues Benetti

Coorientadora: Maria Cristina de Almeida Silva

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Parada Reina, Viviana
TRATAMENTO DE ÁGUA NO PONTO DE USO POR MEIO DA
ASSOCIAÇÃO DE FILTRO BIOSAND E ADSORÇÃO COM CARVÃO DE
OSSO E ALUMINA ATIVADA VISANDO A REMOÇÃO DE
MICRORGANISMOS, TURBIDEZ E FLUORETO / Viviana Parada
Reina. -- 2022.

147 f.

Orientador: Antônio Domingues Benetti.

Coorientadora: Maria Cristina de Almeida Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Tratamento de água no ponto de uso. 2. Remoção
de flúor. 3. Filtro de alumina ativada. 4. Filtro de
carvão de osso. 5. Filtro biosand. I. Domingues
Benetti, Antônio, orient. II. de Almeida Silva, Maria
Cristina, coorient. III. Título.

VIVIANA PARADA REINA

TRATAMENTO DE ÁGUA NO PONTO DE USO POR MEIO DA ASSOCIAÇÃO DE FILTRO
BIOSAND E ADSORÇÃO COM CARVÃO DE OSSO E ALUMINA ATIVADA VISANDO A
REMOÇÃO DE MICRORGANISMOS, TURBIDEZ E FLUORETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Aprovado em: Porto Alegre, 14 de outubro de 2022

Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti - PPGRHSA/UFRGS

Orientador

Prof.^a Dr.^a. Maria Cristina de Almeida Silva - PPGRHSA/UFRGS

Co-orientadora

Prof. Dr. Gino Roberto Gehling - PPGRHSA/UFRGS

Examinador

Prof. Dr. Salatiel Wohlmuth da Silva - PPGRHSA/UFRGS

Examinador

Prof. Dr. José Carlos Alves Barroso Júnior - UFC

Examinador

-Con amor, para mi Roble y mi Luz-

"Pies para qué los quiero, si tengo alas para volar"

- Frida Kahlo

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, a Luz da minha vida. “Gracias ma por enseñarme que las mujeres podemos hacer todo lo que nos propongamos, si trabajamos por nosotras mismas, con constancia y con un propósito claro. Gracias por apoyarme en esta etapa y también gracias por aceptar vivirla conmigo a la distancia. Eres el ejemplo vivo de que el amor traspasa cualquier distancia, hasta la no terrenal”.

À minha vó, Ligia. “Gracias por aferrarte a las ganas de vivir y por permitirnos disfrutar muchas más aventuras a tu lado. Tú sin lugar a dudas, eres la persona más fuerte que conozco y te honro por enseñarme a serlo también. Gracias por preguntar a diario, ¿cuándo vas a regresar?, esa pregunta sin que lo supieras fue mi mayor motivación”.

Ao meu irmão, Lucho. “Gracias por cada aventura que vivimos juntos en Brasil, por los kilómetros que recorrimos en las bicis, por cada atardecer que vimos juntos, por cada café local que conocimos en calles escondidas y por cada una de las aventuras que Porto Alegre y sus alrededores nos permitieron vivir, en lo que para mí han sido los mejores meses compartidos con mi hermano mayor”.

Aos meus anjos, Gustavo, Ángel, Luis e Humberto. “Que proporcionan el apoyo y la compañía que son difíciles de explicar, pero fáciles de sentir”.

À Pau. “Gracias por ser mi apoyo cuando pensé en desistir y sobretodo por darme el privilegio de conocer y ser parte de tu lenguaje de amor”.

À minha melhor amiga, Kelly. “Gracias por siempre estar ahí para mí y por tu apoyo incondicional. Gracias por ser la representación más clara de que los amigos son la familia que uno tiene la fortuna de elegir”.

À minha grande amiga, Núbia. Obrigada por ser meu porto seguro, meu apoio incondicional e por ter ido na Colômbia para me motivar a cumprir este sonho chamado mestrado na UFRGS.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio D. Benetti, obrigado por me apresentar de perto a verdadeira importância de desenvolver conhecimento e ter a oportunidade de propor ideias para melhorar a qualidade de vida das pessoas, a partir da pesquisa.

À minha coorientadora Prof. Dra. Maria Cristina de Almeida, por todo o apoio na pesquisa, pelas conversas sobre a vida e por ser exemplo como mulher pesquisadora.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, pela oportunidade de estudar de forma gratuita e de qualidade no Brasil. Também pelo apoio financeiro na implementação e desenvolvimento do projeto.

Ao técnico do Laboratório de Saneamento da UFRGS, Louidi Albornoz, pela disposição e o apoio constante nas análises.

Aos bolsistas do NESA, Vinícius Soroka e Daniel Campos, por ser parte fundamental durante toda a fase experimental do projeto, sendo apoio nos ensaios e coletas.

Aos meus amigos e colegas do NESA, pelas diversas conversas e por ser parte fundamental na minha experiência de vida em Porto Alegre.

Aos motoristas do IPH, pelo transporte semanal nas coletas na ETE durante a fase experimental.

Ao Laboratório Biolab Química Medicinal do Instituto de Química da UFRGS, pelo apoio no processo de autoclavado do material utilizado nas análises microbiológicas.

Ao Laboratório Central de Microscopia e Microanálise da PUCRS, especialmente ao técnico Wagner Prates, pela amabilidade e apoio nas análises de MEV e EDS.

A todos os meus amigos de Porto Alegre e seus redores, que fizeram destes anos uma experiência inesquecível.

RESUMO

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), o acesso à água potável e ao saneamento é um direito humano essencial para a existência de uma vida digna e produtiva. No entanto, estudos indicam que, no Brasil, 35 milhões de pessoas não tem acesso à água tratada, sendo que 30 milhões desta população residem em áreas rurais. No estado do Rio Grande do Sul (RS), os sistemas públicos de abastecimento de água são, em geral, limitados às áreas urbanas, motivo pelo qual as populações rurais necessitam recorrer a outras fontes de abastecimento, como poços. Contudo, é frequente a ocorrência de microrganismos e do íon fluoreto nestas águas, expondo a população a doenças de curto e longo prazos. Uma pesquisa recente indicou que cerca de um terço dos pequenos sistemas de abastecimento de água no RS apresentam alto risco de contaminação fecal. No presente trabalho, foi construído e avaliado um sistema de tratamento de água no ponto de uso (POU) constituído por um filtro biosand (BSF) seguido de colunas, em paralelo, de carvão de osso (BCF) e de alumina ativada (AAF) visando a remoção de microrganismos e fluoreto da água. Os filtros operaram em duplicata, recebendo água bruta constituída por água declorada contaminada com efluente de tratamento de esgotos sanitários, com adição de 20mg/L de fluoreto e turbidez de 25 UNT. O sistema operou durante 89 dias, com volume de água bruta constante ($\pm 12L$) e tempo de pausa de 24h. O crescimento de biofilmes nos meios suportes e a identificação de elementos presentes foram determinadas com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva (EDS). Após a estabilização e crescimento dos biofilmes, foram alcançadas remoções médias de *E. coli*, no BSF, AAF e BCF de, respectivamente, 97,8%, 100% e 100%. Para coliformes totais, as remoções nos filtros BSF, AAF e BCF foram de, respectivamente, 96,6%, 100% e 100%. As eficiências para turbidez foram 96,4%, 96,3% e 85,1% para os filtros BSF, AAF e BCF. Em relação ao fluoreto, o BCF e AAF alcançaram remoções de, respectivamente, 97,0% e 70,2%. Como esperado, a remoção mais baixa de fluoreto foi o do BSF, 16,3%. Os resultados desta pesquisa demonstraram que a adoção de BSF seguido por o BCF foi capaz de remover organismos fecais (*E. coli*) e fluoreto aos níveis requeridos pela legislação de qualidade da água para consumo humano no Brasil.

Palavras-chave: Tratamento de água no ponto de uso, remoção de flúor da água, filtro de alumina ativada, filtro de carvão de osso, filtro biosand.

ABSTRACT

According to the United Nations Organization, access to drinking water and sanitation is a human right and essential to a dignified and productive life. Nonetheless, studies indicate that, in Brazil, 35 million people do not have access to safe drinking water, with 30 million living in rural areas. In the state of Rio Grande do Sul, public drinking water systems are limited to urban areas, which is why rural populations need to resort to other sources of supply, such as wells. However, it is common the presence of microorganisms and the ion fluoride in these waters, exposing the population to short and long-term illnesses. One option to supply water for isolated rural communities is the adoption of point of use treatment (POU). This study presents the results from a POU water treatment to remove both microorganisms and fluoride from water. The POU system was formed by a biosand filter followed by two columns in parallel, one filled with bone carbon (BCF) and the other with activated alumina (AAF). The filters operated in duplicate, receiving dechlorinated water that had been contaminated with effluent from a wastewater treatment plant, besides receiving the addition of 20mg/L fluoride and 25 UNT turbidity. The system operated for 89 days, receiving a constant volume of water (± 12 L) and 24 h resting period. Biofilm growth in the support medias and elemental composition were determined using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS). After stabilization and biofilm growth, the POU treatment reached average removals of *E. coli* in BSF, AAF and BCF of, respectively, 97,8%, 100% and 100%. For total coliforms, the BSF, AAF and BCF removals were, respectively, 96,6%, 100% and 100%. The efficiencies for turbidity were 96,4%, 96,3% and 85,1%, respectively for the filters BSF, AAF and BCF. With respect to fluoride, BCF and AAF reached removals of, respectively, 97,0% and 70,2%. As expected, the BSF had small reduction in fluoride, 16,3%. The results of this research demonstrated that the association of BSF and BCF was able to remove fecal microorganisms (*E. coli*) and fluoride ions to levels that met the Brazilian water quality concentrations for drinking water.

Keywords: Point of use drinking water treatment, fluoride removal from water, activated alumina filter, bone carbon filter, biosand filter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1. Efeitos diretos e indiretos do abastecimento de água e do esgotamento sanitário sobre a saúde: esquema conceitual.	28
Figura 3.2. Vias de transmissão e exemplos de patógenos relacionados à água.	30
Figura 3.3. Tratamento da água a nível doméstico.	31
Figura 3.4. Protótipos do BSF, a) primeiro protótipo do filtro biosand, b) protótipo de cimento filtro biosand Versão 10.0.	33
Figura 3.5. Distribuição interna das cinco zonas do filtro biosand.	34
Figura 3.6. Componentes e especificações de desenho do filtro biosand versão 10.0.	35
Figura 3.7. Eficiência de tratamento do biofilme em função do tempo.	37
Figura 3.8. Ciclo do flúor através da biogeosfera.	40
Figura 3.9. Porcentagem de eliminação do teor de flúor no corpo humano, após 3h do consumo.	43
Figura 3.10. Estimativa dos percentuais das populações beneficiárias da fluoretação artificial em alguns países da América do Sul.	47
Figura 3.11. Relação da população abastecida e o tipo de fluoretação da água.	48
Figura 3.12. Total das amostras de água das Soluções Alternativas Coletivas (SAC) e Soluções Alternativas Individuais (SAI) de abastecimento não realizadas e analisadas, agrupadas pela classificação do teor de fluoreto, no ano de 2015.	50
Figura 3.13. Total das amostras do Sistema de abastecimento de água (SAA), não realizadas e analisadas, agrupadas pela classificação do teor de fluoreto, no ano de 2015.	50
Figura 4.1. Vista superior do sistema completo formado por o BSF, BCF e AAF.	56
Figura 4.2. Vista lateral das camadas internas e as alturas do desenho no BSF, BCF e AAF.	58
Figura 4.3. Sequência de etapas para utilização do filtro biosand.	59
Figura 4.4. Preparação do material filtrante do BSF: a) cascalho de drenagem depois de exposto ao sol, b) areia de filtração no processo de secagem ao sol, c) diferença da granulometria do cascalho de filtração e drenagem, d) peneiras utilizadas para separação.	60
Figura 4.5. Esquema de separação do cascalho de drenagem e separação e areia de filtração usados no BSF.	61
Figura 4.6. Teste da garrafa para preparar a areia de filtração, o cascalhos separação e de drenagem.	62
Figura 4.7. Construção dos BSF: a) corpo do filtro, instalados em duplicata, b) mecanismo de drenagem instalado na parte inferior do BSF, c) tubulação de saída do BSF, conectado ao sistema de drenagem do filtro.	63
Figura 4.8. Difusor e tampa do difusor: a) difusor antes de ser instalado no BSF, b) distribuição dos furos no interior do difusor do BSF, c) tampa do difusor do BSF.	63
Figura 4.9. Vista lateral do interior do BSF especificando as camadas internas com as respectivas dimensões.	64

Figura 4.10. Materiais adsorventes utilizados no sistema de tratamento para remoção de flúor: a) carvão de osso granular, b) alumina ativada.....	65
Figura 4.11. Vista lateral das camadas internas do BSF, AAF e BCF com as respectivas dimensões.	66
Figura 4.12. Crepinas instaladas nos filtros BCF e AAF: a) vista interna, b) vista lateral...	67
Figura 4.13. Filtros AAF e BCF instalados: a) corpo dos AAF e BCF, b) sistema de tubulação de saída.....	67
Figura 4.14. Sequência de ações para preparação de água bruta.....	68
Figura 4.15. Processo de titulação para decoloração da água: a) amostra bruta, b) amostra com 0,1 ml de Tiosulfato de Sódio, c) amostra final com 0,2 ml de Tiosulfato de Sódio.68	
Figura 4.16. Coleta de esgotos tratados na ETE São João Navegantes: a) decantador secundário, b) local exato de coleta do esgoto tratado.	69
Figura 4.17. Amostras da água com adição de caulinita sob agitação no equipamento Jar-Test.	70
Figura 4.18. Vista lateral do sistema de tratamento completo: a) visual do BSF e filtro de alumina ativada, b) visual do BSF e filtro de carvão de osso.....	71
Figura 4.19. Atividades e análises físicas e químicas realizadas ao longo das semanas.	72
Figura 4.20. Linha de tempo do experimento do sistema de tratamento com o BSF, AAF e BCF.....	73
Figura 4.21. Equipamentos: a) pHmetro KASVI K39-0014PA, b) condutímetro KASVI K53-001.....	77
Figura 4.22. Equipamento TOC-L CPH SHIMADZU para a medição de COT.....	78
Figura 4.23. Equipamento usado na autoclave do material, a) autoclave marca Primatec, b) material no processo de autoclavagem.	79
Figura 4.24. Materiais usados em análises a) <i>E. coli</i> e coliformes totais, b) estufa Brasimet Professional 50.	79
Figura 4.25. Cromatógrafo iônico Eco IC usado para medição do íon fluoreto.....	80
Figura 4.26. Equipamento para medição de turbidez, Turbidímetro HACH - 2100N, modelo 2100N.	81
Figura 5.1. Sistema de tratamento completo instalado, a) vista geral, b) vista lateral c) vista superior do sistema.	82
Figura 5.2. Sequência das etapas para preparação da água bruta.	83
Figura 5.3. Teste Quanti-Tray, a) resultado amostra branco sem presença de coliformes totais, b) resultado amostra branco sem presença de <i>E. coli</i> , c) amostra de água bruta para coliformes totais com concentração de 8475 NMP/100 mL , d) amostra de água bruta com concentração de <i>E. coli</i> de 3945 NMP/100 mL.....	84
Figura 5.4. Concentrações de alcalinidade na água bruta e nos efluentes do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) ao longo do tempo de operação do sistema.	92
Figura 5.5. Gráfico de caixa para as concentrações de alcalinidade na água bruta e filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	93

Figura 5.6. Concentrações de condutividade elétrica na água bruta e nos efluentes do BSF, AAF e BCF em função do tempo de operação do sistema.	94
Figura 5.7. Gráfico de caixa para os valores de condutividade elétrica na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	95
Figura 5.8. Valores de pH medidos na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.	96
Figura 5.9. Gráfico de caixa para os valores de pH na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	97
Figura 5.10 Ensaio de pH, a) coluna de carvão de osso, b) montagem completo para água da torneira, c) coluna com alumina ativada.	98
Figura 5.11. Ensaio de pH com água da torneira nos materiais adsorventes de alumina ativada (AA) e carvão de osso (BC).	98
Figura 5.12. Ensaio de pH com efluente do BSF nos materiais adsorventes de alumina ativada (AA) e carvão de osso (BC).	99
Figura 5.13. Ensaio de pH com água fluoretada nos materiais adsorventes de alumina ativada (AA) e carvão de osso (BC).	99
Figura 5.14. Valores de temperatura da água na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.	100
Figura 5.15. Gráfico de caixa para os valores de temperatura na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	101
Figura 5.16. Valores de COT na água bruta e nos efluentes do BSF, AAF e BCF em função do tempo de operação do sistema.	102
Figura 5.17. Gráfico de caixa para as concentrações de carbono orgânico total (COT) na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	103
Figura 5.18. Concentrações de <i>E. coli</i> na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.	104
Figura 5.19. Concentrações de coliformes totais na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.	105
Figura 5.20. Gráfico de caixa para concentrações de <i>E.coli</i> na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	106
Figura 5.21. Gráfico de caixa para concentrações de coliformes totais na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	106
Figura 5.22. Eficiências de remoções de <i>E. coli</i> nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) ao longo do tempo de operação.	108
Figura 5.23. Eficiência de remoção de coliformes totais nos filtros BSF, AAF e BCF.	109

Figura 5.24. Valores de turbidez na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação.....	110
Figura 5.25. Gráfico de caixa para valores de turbidez na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	111
Figura 5.26. Eficiência de remoção de turbidez nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	112
Figura 5.27. Concentrações de fluoreto na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.	113
Figura 5.28. Gráfico de caixa para as concentrações de fluoreto no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	114
Figura 5.29. Eficiência de remoção de fluoreto nos filtros BSF, AAF e BCF.	115
Figura 5.30. Relação do pH e concentração de fluoreto no filtro de alumina ativada.	117
Figura 5.31. Relação do pH e concentração de fluoreto no filtro de carvão de osso.	117
Figura 5.32. Fotomicrografias das amostras de areia limpa (MEV1, à esquerda) e da superfície da camada de areia filtrante (MEV2, à direita) do filtro biosand (BSF). As letras A, B, C e D são os aumentos de 200 x com medidas dos grãos (A), 500 x (B), 1000 x (C) e 2000 x (D).	119
Figura 5.33. Fotomicrografias de MEV do filtro biosand (BSF) com aumentos de 1000 x (esquerda) e 2000 x (direita). A – areia limpa (MEV1); B – superfície da camada de areia (MEV2); C – 1 cm abaixo da camada superficial (MEV3) e D – 20 cm abaixo da camada superficial (MEV4).	120
Figura 5.34. Fotomicrografias de MEV do AAF em aumentos de 70 x (esquerda), 500 x (meio) e 2000 x (direita). A – alumina ativada limpa (MEV5); B – alumina ativada da superfície (MEV6) e C – alumina ativada no fundo do filtro (MEV7).	121
Figura 5.35. Fotomicrografias de amostras, A – carvão de osso limpo (MEV8); B – carvão na superfície (MEV9) e C – fundo do filtro (MEV10), com aumentos de 70 x (esquerda), 500 x (meio) e 2000 x (direita).	122
Figura 5.36. Locais escolhidos para ensaios EDS, a) na areia limpa (EDS1) e b) na areia da camada superficial do BSF, ambas com magnificação de 1000 x.	123
Figura 5.37. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de areia limpa usada no filtro biosand (EDS1).	124
Figura 5.38. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de areia da superfície do filtro biosand (EDS2).	124
Figura 5.39. Locais de amostragem para os ensaios EDS: a) alumina ativada limpa (EDS3) e b) alumina ativada do fundo do filtro (EDS4).	125
Figura 5.40. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de alumina ativada limpa (EDS3).	126
Figura 5.41. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de alumina ativada do fundo do filtro (EDS4).	126

Figura 5.42. Locais de amostragem para ensaios EDS: a) carvão de osso limpo (EDS5) e b) carvão de osso do fundo do filtro (EDS6).....	127
Figura 5.43. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de carvão ativado limpo (EDS5).....	127
Figura 5.44. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de carvão de osso do fundo do filtro (EDS6).....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Padrão bacteriológico da água para consumo humano nos três tipos de abastecimento de água para consumo humano, SAA, SAC e SAI.....	26
Tabela 3.2 Padrão de turbidez para água pós-desinfecção ou pós-filtração, considerando o número de amostras necessárias e a frequência de amostragem.	27
Tabela 3.3 Valores máximos permitidos de alguns parâmetros físicos e químicos de potabilidade da água.	27
Tabela 3.4. Classificação ambiental das infecções relacionadas com à água.....	29
Tabela 3.5. Limites recomendados para a concentração de flúor em águas para consumo humano em função das médias das temperaturas máximas diárias.....	44
Tabela 3.6. Concentração de flúor e seus efeitos na saúde humana.	46
Tabela 3.7. Relação do tipo de serviço de abastecimento de água, a legislação pertinente e teor de fluoreto requerido.	47
Tabela 3.8. Relação das possibilidades de classificação de cada amostra, com as diferentes fontes de abastecimento de água e a classificação, de acordo com o teor de fluoreto existente.....	49
Tabela 3.9. Relação da aplicabilidade dos métodos para as situações de uso doméstico unifamiliar, comunidades, baixo custo e alta remoção de flúor.	52
Tabela 3.10. Comparação dos métodos de desfluoretação com maior potencial de aplicação em países em desenvolvimento.	55
Tabela 4.1. Materiais e ferramentas usadas para construção e instalação dos dois sistemas paralelos do BSF, BCF e AAF.	57
Tabela 4.2. Parâmetros, métodos analíticos e equipamentos utilizados nos ensaios físico, químicos e biológicos.	74
Tabela 4.3. Volumes de etanol, água deionizada e tempos de imersão usado em cada lavagem.....	76
Tabela 5.1. Valores de turbidez em função da massa de caulinita adicionada.	85
Tabela 5.2. Resultados de ensaios para determinação de massa de fluoreto de sódio.	85
Tabela 5.3. Resultados da aplicação da estatística descritiva aos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos de monitoramento.....	86
Tabela 5.4. Resultados da aplicação do teste ANOVA aos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos de monitoramento.	89
Tabela 5.5. Eficiências mínima, média e máxima de remoções de <i>E. coli</i> nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).....	107
Tabela 5.6. Eficiência mínima, média e máxima de remoção de coliformes totais nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).	108
Tabela 5.7. Eficiências mínimas, médias e máximas de remoções de turbidez nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF), antes e após 45 dias de operação.....	112

Tabela 5.8. Eficiências mínima, média e máxima de remoção de fluoreto nos filtros BSF, AAF e BCF.....	115
Tabela 9.1. Materiais e ferramentas usadas para instalação dos dois sistemas paralelos de filtros biosand (BSF) e de carvão ativado de osso (BCF) e de alumina ativada (AAF).....	138
Tabela 9.2. Custos de construção, operação e monitoramento do sistema de tratamento. (Valores de Dezembro 2021).....	140
Tabela 9.3. Resultados da análise estatística com ANOVA dos parâmetros físicos, químicos e biológicos analisados no estudo, com nível de significância de 0,05 da análise estatística com ANOVA nos parâmetros físicos, químicos e biológicos analisados no estudo.	142

LISTA DE ABREVIATURAS

AA: Alumina Ativada

AAF: Activated Alumina Filter

BCF: Bone Char Filter

BSF: Filtro Biosand

CAWST: Centre for Affordable Water and Sanitation Technology

CEMM: Centro de Microscopia Eletrônica e Microanálise

CEVS: Centro Estadual de Vigilância em Saúde

CIT: Carbono Inorgânico Total

CO: Carvão de Osso

CORSAN: Companhia Rio-Grandense de Saneamento

COT: Carbono Orgânico Total

CT: Carbono Total

E. coli: Escherichia coli

EDS: Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva

ETA: Estação de Tratamento de Água

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto

FAS: Sulfato Ferroso Amoniacal Hexahidratado

FUNASA: Fundação Nacional de Saúde

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDEA: Centro de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LABSAN: Laboratório de Saneamento

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

NaF: Fluoreto de Sódio

NEERI: Instituto Nacional de Pesquisa de Engenharia Ambiental

NESA: Núcleo de Estudos em Saneamento Ambiental

NMP: Número Mais Provável

OMS: Organização Mundial da Saúde

ONU: Organização das Nações Unidas

OPAS: Organização Pan-Americana da Saúde

pH: Potencial Hidrogeniônico

PNSR: Programa Nacional de Saneamento Rural

POU: Point Of Use – Ponto de Uso

PUCRS: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

RPM: Revoluções Por Minuto

RS: Rio Grande do Sul

SAA: Sistema de Abastecimento de Água

SAC: Solução Alternativa Coletiva de Abastecimento de Água

SAI: Solução Alternativa Individual de Abastecimento de Água

SISAGUA: Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano

SODIS: Desinfecção solar da água

SSMA: Secretaria da Saúde e do Meio Ambiente

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USP: Universidade de São Paulo

UV: Ultravioleta

VMP: Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
2	OBJETIVOS.....	24
2.1	OBJETIVO GERAL.....	24
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
3.1	QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	25
3.1.1	Saneamento ambiental e sua relação com a saúde pública.....	28
3.2	TRATAMENTO DA ÁGUA NO PONTO DE USO.....	30
3.2.1	Filtro biosand.....	32
3.2.2	Vantagens e desvantagens do filtro biosand.....	39
3.3	FLÚOR NO AMBIENTE.....	39
3.3.1	Vias de exposição aos fluoretos.....	40
3.3.2	Metabolismo do flúor.....	42
3.3.3	Legislação da fluoretação na água para consumo humano no Brasil.....	43
3.3.4	Efeitos da exposição ao flúor na saúde.....	45
3.4	FLUORETAÇÃO NA ÁGUA DE ABASTECIMENTO.....	46
3.4.1	Fluoretação da água nos municípios do estado do Rio Grande do Sul.....	47
3.4.2	Processo de adsorção.....	52
3.4.3	Critérios de avaliação das tecnologias de tratamento.....	55
4	METODOLOGIA.....	56
4.1	PROJETO DO SISTEMA DE TRATAMENTO.....	56
4.1.1	Materiais usados para construção dos filtros.....	57
4.1.2	Montagem do sistema completo.....	57
4.1.3	Filtro biosand.....	58
4.1.4	Filtro de carvão de osso e alumina ativada.....	65
4.2	PREPARAÇÃO DA ÁGUA AFLUENTE AO FILTRO BIOSAND.....	68
4.2.1	Inativação do cloro.....	68
4.2.2	Adição de microrganismos de esgotos.....	69
4.2.3	Adição de turbidez.....	69

4.2.4	Adição de flúor.....	70
4.3	OPERAÇÃO DO SISTEMA COMPLETO DE TRATAMENTO.....	71
4.3.1	Tempo de operação do sistema de tratamento completo.....	72
4.4	MONITORAMENTO DO SISTEMA DE TRATAMENTO.....	74
4.4.1	Alcalinidade.....	75
4.4.2	Biofilme.....	75
4.4.3	Condutividade, pH e temperatura.....	77
4.4.4	Carbono orgânico total.....	78
4.4.5	<i>Escherichia coli</i> e coliformes totais.....	79
4.4.6	Fluoreto.....	80
4.4.7	Turbidez.....	80
4.5	TRATAMENTO DOS DADOS.....	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
5.1	INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO COMPLETO.....	82
5.2	PREPARAÇÃO DA ÁGUA DO ESTUDO.....	82
5.2.1	Inativação do cloro.....	83
5.2.2	Adição de coliformes totais e <i>Escherichia coli</i>	83
5.2.3	Adição de turbidez.....	84
5.2.4	Adição de flúor.....	85
5.3	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO EM RELAÇÃO A REMOÇÃO DOS CONTAMINANTES.....	86
5.3.1	Análises físicas, químicas e microbiológicas.....	86
5.4	DISCUSSÃO.....	91
5.4.1	Alcalinidade.....	91
5.4.2	Condutividade.....	93
5.4.3	pH.....	95
5.4.4	Temperatura da água.....	100
5.4.5	Carbono orgânico total.....	101
5.4.6	<i>Escherichia Coli</i> e coliformes totais.....	103
5.4.7	Turbidez.....	109
5.4.8	Fluoreto.....	112

5.4.9	Biofilme	118
5.4.10	Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva (EDS).....	123
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
6	CONCLUSÕES	130
7	RECOMENDAÇÕES.....	131
8	BIBLIOGRAFIA	132
9	ANEXO	138
9.1	Materiais usados para construção dos filtros	138
9.2	Custos envolvidos no experimento	140
9.3	Resultados análise com ANOVA.....	142

LISTA DE SIMBOLOS

% : Por cento

” : Polegada

°C: Graus celsius

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: Micrograma por metro cúbico

μm : Micrometro

$\mu\text{S}/\text{cm}$: MicroSiemens por centímetro

$\text{Al}(\text{OH})_3$: Hidróxido de alumínio

Al_2O_3 : Óxido de alumínio

As: Arsênio

Ca: Cálcio

cm: Centímetro

F^- : Fluoreto

g/kg: Grama por quilograma

h: Hora

H_2O : Água

H_2SO_4 : Ácido sulfúrico

HF: Ácido Fluorídrico

$\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$: Litro por minuto por metro quadrado

L/min: Litro por minuto

L: Litro

m: Metro

m²: Metro quadrado

mg/kg: Miligrama por quilograma

mg/L: Miligrama por litro

mg/m³: Miligrama por metro cúbico

mg: Miligrama

min: Minuto

mL/min: Mililitro por minuto

mL: Mililitro

mm: Milímetro

mmol/L: Milimol por litro

N: Normalidade

NaF: Fluoreto de Sódio

PO₄⁻³: Ânion fosfato

UNT: Unidade Nefelométrica de Turbidez

uT: Unidade de Turbidez

1 INTRODUÇÃO

O reconhecimento do direito a água potável e ao saneamento como essenciais para o pleno gozo da vida e de todos os direitos humanos, estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) no ano 2010, surge da importância de estabelecer parâmetros de igualdade em termos de distribuição, acesso e qualidade dos recursos hídricos no mundo. No entanto, o exercício do direito humano à água pode variar em função de diversas condições como a disponibilidade, acessibilidade física e econômica à água, entre outras (CONSEA, 2014).

Segundo o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), publicado em 2019 pela Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), no Brasil residem 35 milhões de pessoas que não têm acesso a água tratada, sendo que 30 milhões destas pessoas estão localizadas em áreas rurais (FUNASA, 2019).

No estado do Rio Grande do Sul (RS), os sistemas públicos de abastecimento de água na maioria dos municípios são limitados às áreas urbanas. Assim, as populações das zonas rurais usam sistemas alternativos de abastecimento, os quais provêm de fontes naturais e poços freáticos ou artesianos. No entanto, a qualidade de água destas fontes pode apresentar características físicas, químicas e biológicas acima dos valores permitidos para consumo humano e necessitam de tratamento adequado (BRASIL, 2021).

Muitos sistemas de abastecimento de água no Brasil adicionam fluoreto à água potável como estratégia de proteção às cáries dentárias. As concentrações finais de flúor situam-se na faixa de 0,5 a 1,0 mg/L. A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2017) recomenda que a concentração de fluoreto na água potável não ultrapasse 1,5 mg/L. A ingestão prolongada e contínua de altas concentrações de flúor pode provocar doenças (FAWELL et al., 2006) como as fluorose dentárias e esquelética, além de diversos tipos de cânceres, danos ao sistema nervoso central e alterações na tiroide e no sistema reprodutor (FUNASA, 2012).

O Brasil estabelece o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade através da Portaria GM/MS No. 888, de 04 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021). Esta portaria requer que a concentração de fluoreto em águas de abastecimento não ultrapasse 1,5 mg F/L. No estado do RS, a Secretaria de Saúde estabelece 0,8 mg F/L, como a concentração ideal na água destinada ao consumo humano, não devendo estar abaixo ou acima de, respectivamente, 0,6 e 0,9 mg F/L (RIO GRANDE DO SUL, 1999).

Em termos de padrões microbiológicos, a Portaria No 888/2021 determina que os parâmetros microbiológicos *Escherichia coli* e coliformes totais devam estar ausentes da água para consumo humano (BRASIL, 2021). *E. coli* e coliformes totais são usados, respectivamente, como indicadores de contaminação fecal e de eficiência de tratamento.

Contudo, esta não é a realidade da maioria dos pequenos sistemas de abastecimento de água no RS, que apresentam ou têm riscos de contaminação fecal (DEBIASE; BENETTI, 2019).

A desfluoretação deve ser usada quando a água apresenta concentrações de flúor que podem ser prejudiciais à saúde. Águas subterrâneas em contato com minerais ricos em fluoretos frequentemente apresentam concentrações altas destes íons (WHO, 2017). Existem diversos métodos de desfluoretação da água, como a troca iônica, osmose inversa, eletrodialise, precipitação por contato e adsorção. Os métodos são avaliados considerando aspectos de operação, custos, eficiências de remoções e população atendida. Entre as metodologias mais adequadas para uso doméstico, destacam-se a utilização de carvão de osso (CO) e a alumina ativada (AA) como materiais adsorventes (FEENSTRA; VASAK; GRIFFIOEN, 2007).

A implementação de tecnologias de tratamento de água no ponto de uso (POU) têm sido recomendadas como uma solução adequada para o fornecimento de água segura em regiões ou locais onde as famílias não têm acesso aos sistemas convencionais de tratamento e abastecimento de água potável (SOBSEY, 2002). O tratamento da água no POU propõe o critério de multi-barreiras para reduzir o risco de contaminação da água para consumo. As etapas desta abordagem incluem: proteção da fonte, sedimentação, filtração, desinfecção e armazenamento seguro da água tratada (CAWST, 2012).

O filtro biosand (BSF), é uma das tecnologias de tratamento de água mais implementadas no POU. O conceito do BSF é semelhante ao do filtro lento, que tem sido usado por comunidades para filtrar a água por mais de 200 anos. Entretanto, o filtro BSF é adaptado para operar no ponto-de-uso e com fluxo intermitente (CAWST, 2012). Como observado na literatura o BSF não é capaz de remover satisfatoriamente íons fluoreto. Assim, a bibliografia tem apontado como possível solução para remoção desses íons, o uso de colunas de adsorção utilizando carvão de osso (CO) e alumina ativada (AA).

Portanto, é necessário realizar estudos que abordem o uso simultâneo em sequência do BSF e em paralelo o BCF e AAF para remoção de microrganismos e de íons fluoretos de águas contaminadas. Esta alternativa permitiria o acesso de muitas famílias em áreas rurais a uma água mais segura para consumo, com impactos positivos na manutenção da saúde.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho foi avaliar a eficiência do tratamento da água no ponto de uso por filtro biosand associado a adsorção em carvão de osso e alumina ativada para a remoção conjunta de microrganismos, turbidez e fluoreto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a eficiência de remoção da turbidez, *Escherichia coli* e coliformes totais na água bruta através do filtro biosand.
- Determinar e comparar as eficiências de remoção de fluoreto nos filtros usando carvão de osso e alumina ativada como materiais adsorventes.
- Avaliar o uso de filtro biosand como pré-tratamento ao processo de remoção de fluoreto para produzir água segura para consumo humano.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No ano 2010, a Resolução nº 64/292 da Organização das Nações Unidas reconheceu os acessos à água potável e ao esgotamento sanitário como partes fundamentais dos direitos humanos. A resolução reforça a relação direta entre acesso à água e vida digna para todos.

3.1 QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

Toda água para consumo humano, isto é, destinada à ingestão, preparação de alimentos e à higiene pessoal, deve ser potável (BRASIL, 2021). Água potável é aquela que atende ao padrão de potabilidade e que não oferece riscos à saúde. Cerca de 2,2 bilhões de pessoas no mundo não têm acesso a água potável em suas residências e outros 3 bilhões não dispõem de instalações básicas para lavar as mãos (ONU, 2019). Cerca de 144 milhões de pessoas bebem água diretamente de fontes contaminadas de água e oito em cada dez pessoas que vivem em áreas rurais não têm acesso a serviços básicos de saneamento (ONU, 2019).

No Brasil, segundo a FUNASA (2019), 40,5% da população residente nas áreas rurais possuem atendimento adequado em termos de abastecimento de água. No entanto, 33,5% dessa população rural, possuem atendimento precário em termos de padrões de potabilidade e/ou com intermitência prolongada no fornecimento.

A deficiente atenção para políticas públicas de saneamento básico nas áreas rurais brasileiras tem sido uma constante na história do país. As ações de saneamento rural no Brasil têm sido executadas de forma fragmentada e descontínua. Sempre há dificuldades em manter a continuidade dos serviços após o término da instalação das infraestruturas. A falta de manutenção ocorre devido ao déficit no acesso aos serviços, a vulnerabilidade das famílias rurais e o subdesenvolvimento socioeconômico nessas regiões do território brasileiro. Isto se reflete na ocorrência de doenças de veiculação hídrica na população (FUNASA, 2018).

No Brasil, existem três tipos de sistemas de abastecimento de água para consumo humano. O primeiro é o Sistema de Abastecimento de Água (SAA), composta por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais. O SAA destina-se à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição. A Solução Alternativa Coletiva de Abastecimento de Água (SAC) também se destina ao abastecimento coletivo de água potável, porém o sistema não tem rede de distribuição. O terceiro tipo de sistema é a Solução Alternativa Individual de Abastecimento de Água (SAI), que é a modalidade que atende a domicílios residenciais com uma única família (BRASIL, 2021).

No Brasil, é competência da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, monitorar os indicadores estabelecidos para avaliação da qualidade da água para consumo humano. O poder público tem o dever de informar à população, de forma clara e acessível, sobre a qualidade da água fornecida e os riscos associados ao seu consumo, conforme o Decreto nº 5.440, de 4 de maio de 2005 (Brasil, 2021). No ano 2021, foi reconhecido, por meio da Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, a alteração do Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores máximos permitidos (VMP) dos parâmetros bacteriológicos, especificamente dos coliformes totais e *Escherichia coli* na água para consumo humano no Brasil.

Tabela 3.1 Padrão bacteriológico da água para consumo humano nos três tipos de abastecimento de água para consumo humano, SAA, SAC e SAI.

Formas de abastecimento		Parâmetro		VMP ¹
SAI		<i>Escherichia coli</i> ²		Ausência em 100 mL
SAA e SAC	Na saída do tratamento	Coliformes totais ³		Ausência em 100 mL
	Sistema de distribuição e pontos de consumo	<i>Escherichia coli</i> ²		Ausência em 100 mL
		Coliformes totais ⁴	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes.	Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, poderá apresentar resultado positivo.
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes.	Ausência em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água.
1. Valor Máximo Permitido.				
2. Indicador de contaminação fecal.				
3. Indicador de eficiência de tratamento.				
4. Indicador da condição de operação e manutenção do sistema de distribuição de SAA e pontos de consumo e reservatório de SAC em que a qualidade da água produzida pelos processos de tratamento seja preservada (indicador de integridade).				

Fonte: (BRASIL, 2021)

A Tabela 3.2, apresenta os VMP de turbidez, assim como também apresenta o número de amostras e frequência de amostragem para os diferentes tratamentos de água para consumo humano no Brasil, especificamente para águas subterrâneas.

Tabela 3.2 Padrão de turbidez para água pós-desinfecção ou pós-filtração, considerando o número de amostras necessárias e a frequência de amostragem.

Tratamento da água	VMP¹	Número de amostras	Frequência
Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	0,5 uT ² em 95% das amostras. 1,0 uT ² no restante das amostras mensais coletadas	1	A cada 2 h
Filtração em Membrana	0,1 uT ² em 99% das amostras	1	A cada 2 h
Filtração lenta	1,0 uT ² em 95% das amostras. 2,0 uT ² no restante das amostras mensais coletadas	1	Diária
Pós-desinfecção (para águas subterrâneas)	1,0 uT ² em 95% das amostras. 5,0 uT ² no restante das amostras mensais coletadas	1	Semanal

1. Valor Máximo Permitido. 2. Unidade de Turbidez

Fonte: (BRASIL, 2021)

Na Tabela 3.3 são ilustrados os limites para alguns parâmetros físicos e químicos que serão tratados no presente estudo. Estes valores são estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021).

Tabela 3.3 Valores máximos permitidos de alguns parâmetros físicos e químicos de potabilidade da água.

Parâmetro	VMP¹	Unidade
Fluoreto	1,5	mg/L
Nitrato (como N) ²	10	mg/L
Nitrito (como N) ²	1	mg/L
Dureza Total	300	mg/L
Sulfato	250	mg/L
pH	6 - 9	
Sólidos Dissolvidos Totais	500	mg/L
Cor Aparente	15	mg Pt-Co/L
Cloreto	250	mg/L
Sódio	200	mg/L

1. Valor Máximo Permitido. 2. A soma das razões das concentrações de nitrito e nitrato e seus respectivos VMPs, não deve exceder 1.

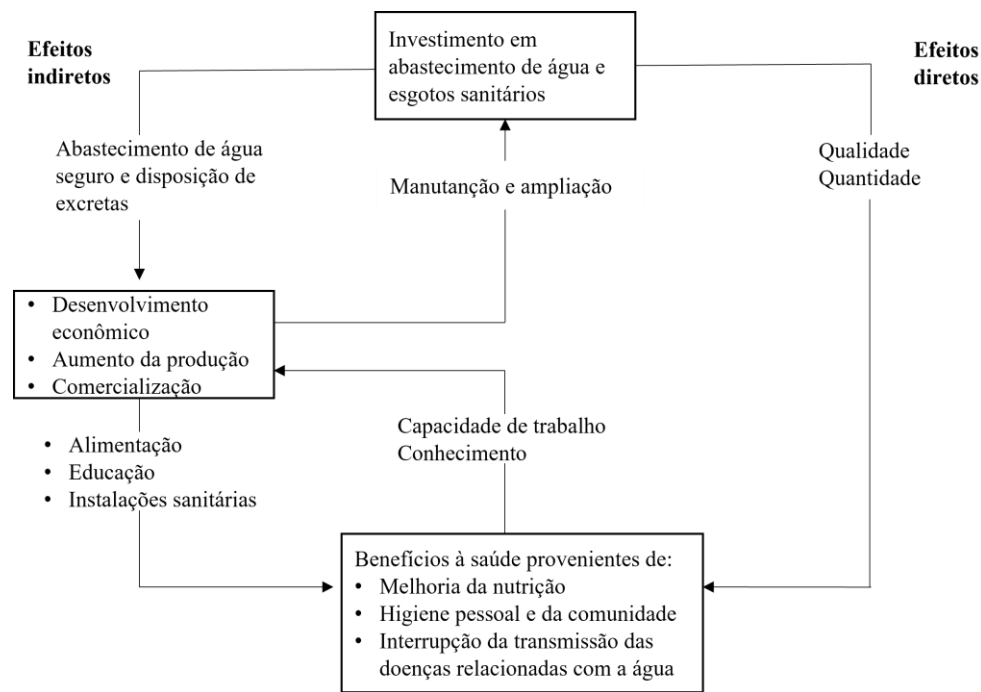
Fonte: (BRASIL, 2021)

3.1.1 Saneamento ambiental e sua relação com a saúde pública

O saneamento ambiental é definido como o conjunto de ações que tem por objetivo alcançar a salubridade ambiental, por meio de abastecimento de água potável, coleta e disposição sanitária de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, promoção do ordenamento sanitário do uso do solo, adequada drenagem urbana, controle de doenças transmissíveis e demais serviços e obras especializadas de modo a preservar condições adequadas de vida urbana e rural (FUNASA, 2004). A falta de saneamento ambiental é uma das principais causas da poluição e da contaminação das águas usadas para o abastecimento humano, contribuindo para o aumento dos casos de doenças de veiculação hídrica (PAIVA; SOUSA, 2018) Alguns fatores que influenciam o impacto do saneamento sobre a saúde humana são: nível da intervenção, funcionamento e utilização dos serviços, nível de exposição ao agente patogênico e status socioeconômico (FUNASA, 2010).

Vários autores evidenciaram a relação direta entre a situação de saúde pública e o saneamento ambiental. Cvjetanovic (1986) ilustra o modelo no qual se prevê que ações de abastecimento de água e de esgotamento sanitário proporcionam benefícios gerais sobre a saúde da população. Os benefícios se dão por vias direta e indireta, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1. Efeitos diretos e indiretos do abastecimento de água e do esgotamento sanitário sobre a saúde: esquema conceitual.



Fonte: adaptado de Cvjetanovic (1986)

Heller. (1998) aponta como indicador de morbidade as doenças diarreicas, empregado amplamente por estudos de impacto do saneamento. A classificação ambiental de doenças infecciosas relacionadas à água é apresentada na Tabela 3.4. Há quatro categorias de transmissão: 1. Feco-oral; 2. Relacionadas com a higiene; 3. Baseada na água; 4. Através de inseto vetor. Estas doenças são passíveis de controle, ou pelo menos podem ser influenciadas, através do abastecimento de água (CAIRNCROSS; FEACHEM, 1993).

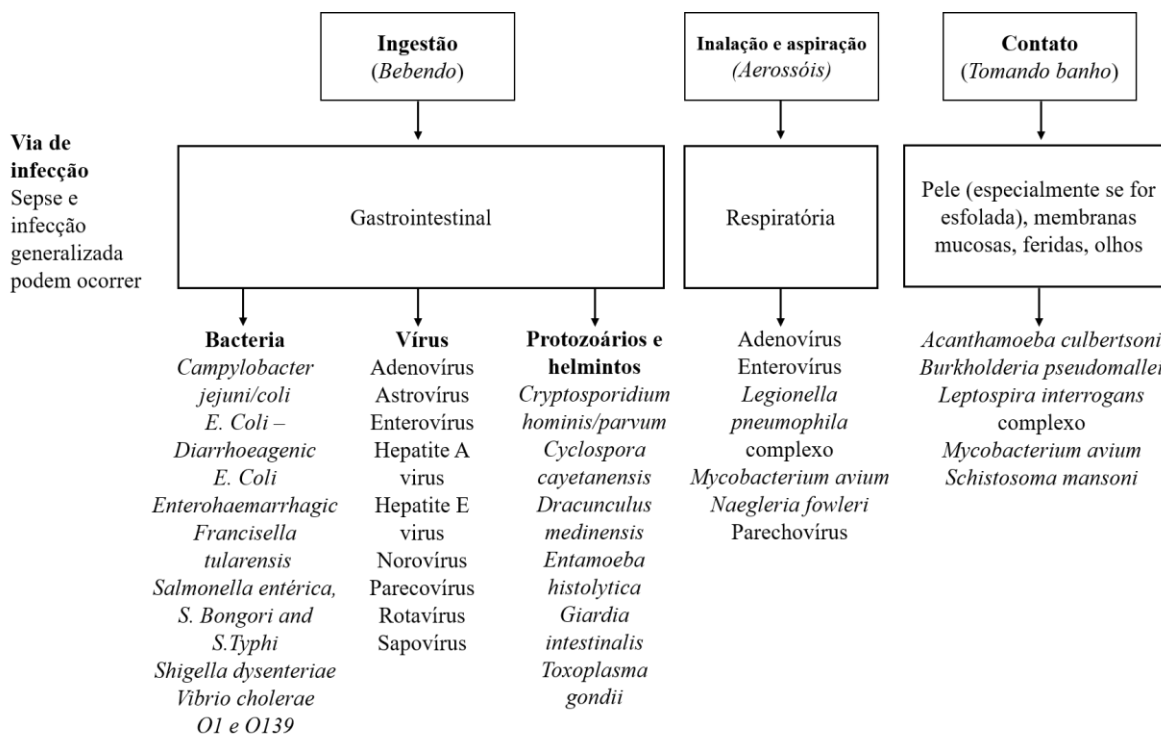
Tabela 3.4. Classificação ambiental das infecções relacionadas com à água.

Categoria	Infecção
1. Feco-oral (ingestão de água ou contato com a água)	Diarreias e disenterias Disenteria amebiana Balantidíase Enterite campylobacteriana Cólera Criptosporidiose Diarreia por <i>Escherichia coli</i> Giardíase Diarreia por rotavírus Salmonelose Shigelose (disenteria bacilar) Yersinose Febres entéricas Febre tifoide Febre paratifóide Poliomielite Hepatite A Leptospirose
2. Relacionadas com a higiene a) Infecções da pele e dos olhos b) Outras	Doenças infecciosas da pele Doenças infecciosas dos olhos Tifo transmitido por pulgas Febre recorrente transmitida por pulgas
3. Baseada na água a) Por penetração na pele b) Por ingestão	Esquistossomose Difilobotríase e outras infecções por helmintos
4. Transmissão por inseto vetor a) Picadura próxima à água b) Procriam na água	Doença do sono Filariose Malária Arboviroses Febre amarela Dengue Leishmaniose

Fonte: Cairncross; Feachem (1993); Heller. (1998).

Embora o consumo de água potável contaminada represente o maior risco, outras vias de transmissão também podem levar a doenças, com a presença de alguns patógenos transmitidos por diferentes vias de infecção (WHO, 2017). As principais vias de transmissão e alguns exemplos de patógenos relacionados à água são apresentadas na Figura 3.2.

Figura 3.2. Vias de transmissão e exemplos de patógenos relacionados à água.



Fonte: adaptado de WHO (2017).

3.2 TRATAMENTO DA ÁGUA NO PONTO DE USO

As alternativas de sistemas para o tratamento da água no ponto de uso (POU) têm como objetivo reduzir a turbidez e eliminar patógenos da água antes do consumo. Eventualmente, podem ser reduzidos elementos e compostos químicos, como fluoreto, nitrato e arsênio. As alternativas podem ser incluídas nos seguintes grupos: i) sistemas baseados em calor e radiação ultravioleta UV (ebulição, radiação solar, lâmpadas UV), ii) tratamento químico (coagulação, floculação, adsorção, troca iônica, desinfecção) e iii) processos de remoção física (sedimentação e filtração, incluindo membranas; filtros de cerâmica e fibras; filtros de meios granulares, como filtros de areia) (PETER-VARBANET et al ., 2009).

O tratamento POU associado ao armazenamento seguro em nível doméstico oferece uma alternativa para o abastecimento de água em locais onde não existe tratamento e a água é insegura (SOBSEY et al., 2006). A Figura 3.3 ilustra o método das múltiplas barreiras para produzir água segura para o consumo humano.

Figura 3.3. Tratamento da água a nível doméstico.



Fonte: adaptado de CASWT (2012).

Proteger a fonte de água é o primeiro passo do método das barreiras múltiplas. Ela busca evitar que águas de escoamento superficiais, esgotos e dejetos animais entrem em contato com a fonte de água. A sedimentação da água elimina as partículas maiores e geralmente remove cerca de 50% dos patógenos. O processo de filtração complementa a etapa anterior, removendo as partículas menores e mais de 90% dos patógenos. A filtração pode ser realizada em diferentes tipos de filtros, como o BSF e o de cerâmica. A desinfecção elimina os patógenos restantes na água, mediante a utilização de cloro, calor ou desinfecção solar (SODIS). O último passo do método das barreiras múltiplas, promove o armazenamento da água de forma segura, em um local onde não possa ser contaminada novamente (CAWST, 2012).

Existem várias tecnologias de tratamento no POU, que emergem como uma alternativa de abordagem econômica para proteger a saúde das populações mais vulneráveis em termos de carência de água potável para consumo. Fiebelkorn *et al.* (2012) avaliaram diferentes tecnologias que demonstraram eficácia em termos de tratamento de água de baixo custo na prevenção da diarreia. Os autores consideraram: i) intervenção através de implementação de tratamento de água no ponto de uso, ii) avaliação da mudança de comportamento como resultado e iii) aplicação em um país de baixo ou médio desenvolvimento. De um total de 1522 artigos inicialmente considerados, foram analisados em detalhe 26, 14 (54%) desenvolvidos na África, 5 (19%) na América Central, 4 (15%) na América do Sul e 3 (12%) na Ásia. Os 26 artigos, preencheram os 4 critérios de inclusão usando 5 diferentes tecnologias de tratamento no ponto de uso: i) sistemas denominados de “água segura”, tecnologia que inclui o processo de cloração da água (LUBY et al., 2004); ii) desinfecção solar (SODIS), que utiliza energia solar, radiação e calor para desinfetar a água armazenada em garrafas plásticas transparentes (CONROY et al., 1999); iii) uma combinação de processos químicos de floculação e desinfecção com um único composto, o qual facilita a remoção de matéria orgânica em suspensão, bactérias, vírus, parasitas e metais pesados da água (RELLER et al., 2003); iv) filtros cerâmicos, incluindo filtros tipo vela, os quais fazem uso

de uma vela de cerâmica porosa para filtrar mecanicamente patógenos microbianos (CLASEN et al., 2005) (BROWN; PROUM; SOBSEY, 2009); e v) o BSF que consistem em areia e cascalho em um recipiente projetado para uso doméstico (STAUBER et al., 2006).

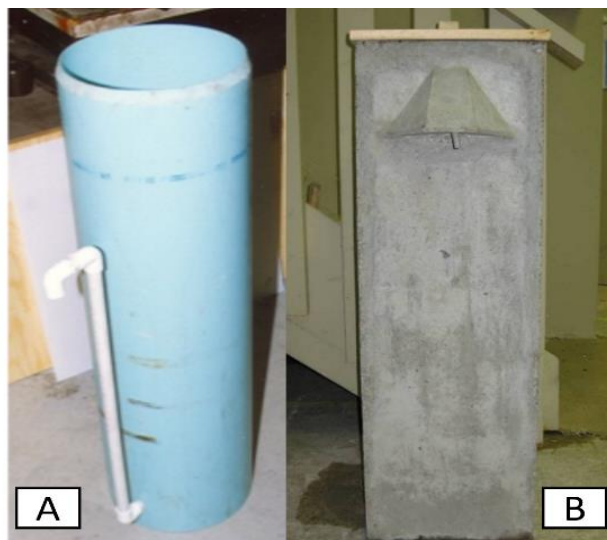
3.2.1 Filtro biosand

O filtro biosand (BSF) é uma adaptação do tradicional filtro lento de areia que vem sendo usado por comunidades para filtrar a água por mais de 100 anos. O BSF foi desenvolvido pelo professor David Manz da Universidade de Calgary, inspirado por visitas a comunidades pobres na África e Ásia nos anos 1988 e 1989. Dois anos depois, foi apresentado o primeiro protótipo do BSF, adaptado para ser usado em unidades unifamiliares. Esse protótipo removeu, em condições de laboratório, 100% de parasitas, até 98,5% bactérias, entre 70 e > 99% de vírus, além de turbidez < 1 UNT em 95% das amostras (MANZ, 2019) (CAWST, 2012).

Financiado pela Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS), através de um projeto gerido pela Universidade de Calgary, Manz e sua equipe instalaram no ano 1993 o primeiro protótipo do BSF, feito com recipientes plásticos, em uma comunidade na cidade de Manágua na Nicarágua. Apesar do sucesso, o projeto do BSF não recebeu mais apoio por parte do Governo de Canadá e da Universidade de Calgary. Os filtros continuaram funcionando por dois anos sem assistência alguma por parte da equipe do professor. Posteriormente, o projeto do BSF foi descoberto por uma organização sem fins lucrativos, Samaritan's Purse no Canadá. Esta organização apoiou o projeto e atualmente mais de 90% dos BSF são construídos localmente e continuam sendo apoiados por organizações sem fins lucrativos, como a Samaritan's Purse e The Centre for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST), assim como muitas outras ao redor do mundo (MANZ, 2019). A Figura 3.4 ilustra os protótipos das versões em plástico e cimento do BSF.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Banco Mundial notaram o impacto do BSF sobre a saúde nas comunidades mais vulneráveis onde era disponível, gerando reconhecimento como uma tecnologia adequada para o tratamento de água no ponto de uso (MANZ, 2019).

Figura 3.4. Protótipos do BSF, a) primeiro protótipo do filtro biosand, b) protótipo de cimento filtro biosand Versão 10.0.



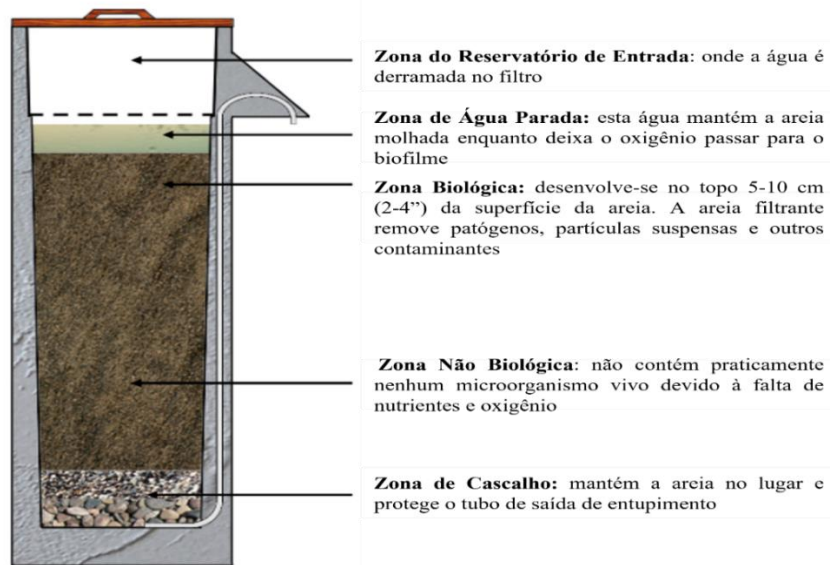
Fontes: (MANZ, 2019) (CAWST, 2012).

O BSF é projetado para uso intermitente, mais adequado para uso doméstico. Pode ser construído com materiais de fácil acesso e baixo custo, em comparação com outros métodos de tratamento da água (CAWST, 2012). Desta forma, é bastante viável para ser implementado em zonas rurais.

Embora a capacidade do sistema lento tradicional de filtros de areia para reduzir patógenos na água esteja bem documentada, a eficácia do BSF é variável porque cada filtro pode ser adaptado em termos de desenho e propriedades operacionais diferentes, segundo as necessidades do local. Os tradicionais filtros lentos de areia são operados de maneira contínua a uma altura manométrica e vazão constantes, sendo a parte superior da camada de areia de filtração substituída periodicamente. Ao contrário, o filtro BSF é operado de forma intermitente, a altura e vazão variam. O biofilme é limpo periodicamente, segundo as necessidades do tratamento da água, evitando a acumulação de contaminantes e o excesso de crescimento de material biológico (SOBSEY et al., 2006).

O filtro biosand caracteriza-se por ter cinco diferentes zonas, as quais são apresentadas na Figura 3.5: 1) zona do reservatório de entrada, 2) zona de água parada, 3) zona biológica, 4) zona não biológica, 5) zona de cascalho.

Figura 3.5. Distribuição interna das cinco zonas do filtro biosand.



Fonte: (CAWST, 2012)

Patógenos e sólidos suspensos são removidos através de uma combinação de processos físicos e biológicos que ocorrem no biofilme e dentro da camada de areia de filtração. Estes processos incluem: aprisionamento mecânico, predação, adsorção e morte natural dos microrganismos. No processo de aprisionamento mecânico, os sólidos suspensos e patógenos são fisicamente presos nos espaços entre os grãos de areia. No processo de predação, os patógenos são consumidos por outros microrganismos no biofilme. Na adsorção, ocorre a aderência aos grãos de areia. Por fim, ocorre a morte natural por término do ciclo de vida, de alimento ou oxigênio (CAWST, 2012).

3.2.1.1 Componentes e desenho do filtro biosand

Todas as informações a partir do item 3.2.2 até o 3.2.2.7 são referências do CAWST (2012).

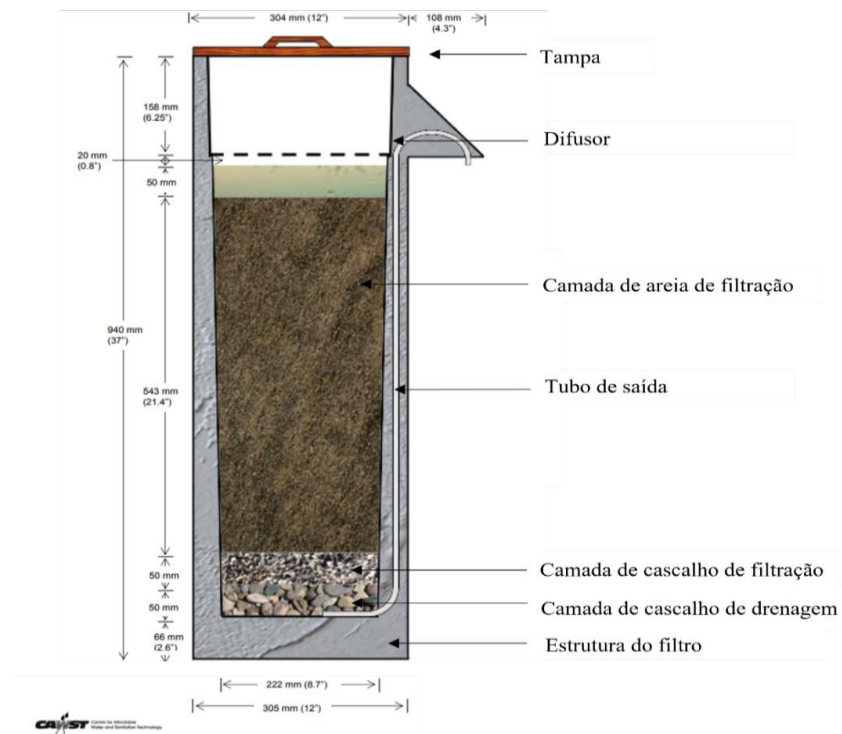
O BSF tem sete componentes principais. A *tampa* é o elemento que impede a contaminação e entrada de organismos indesejados ao sistema. O *difusor* distribui a água do reservatório ao interior do BSF. Tem pequenos furos que permitem à água passar lentamente em direção à área de filtração, impedindo alterações do biofilme. A *camada de areia de filtração* é o componente mais importante do BSF. Nela são removidos patógenos e sólidos suspensos, por isso deve ser preparada de maneira correta para garantir o adequado

funcionamento do filtro. A *camada de cascalho de filtração* é o suporte da areia, evitando sua perda e bloqueio da saída. A *camada de cascalho de drenagem* evita o movimento do cascalho de filtração e facilita o escoamento da água. O *tubo de saída* conduz a água filtrada ao exterior do filtro. Por fim, a *estrutura do filtro* armazena as camadas de areia e cascalhos, podendo ser cilíndrica ou quadrada. A Figura 3.6 apresenta os componentes descritos do filtro.

Na última versão 10.0 do BSF, há a recomendação de se utilizar uma vazão de filtração de 0,4 L/min. Nas versões 8 e 9 do BSF, a taxa de filtração recomendada era de 0,6 L/min. Se a taxa de filtração for muito rápida (mais de 0,45 L/min), é possível que os patógenos percorram rapidamente as camadas do filtro, diminuindo as remoções. Por outro lado, se a taxa de filtração for muito lenta (menos de 0,3 L/min), o filtro trata de forma adequada a água, no entanto, não atingirá o volume necessário de água para consumo por dia. Destaca-se que o volume do reservatório é de 12 litros.

Para o correto funcionamento do filtro, recomenda-se que a profundidade da água parada deva ser de 5 cm acima da areia durante o período de pausa, o que permite a passagem de oxigênio para os microrganismos presentes no biofilme. Em profundidade da água parada menor que 4 cm, a evaporação que ocorre em temperaturas quentes pode causar danos ao biofilme, tornando-o seco e sem desenvolvimento.

Figura 3.6. Componentes e especificações de desenho do filtro biosand versão 10.0.



Fonte: (CAWST, 2012).

3.2.1.2 Operação

O filtro BSF deve ser operado de maneira adequada para alcançar os níveis de tratamento esperado. A fonte de água, biofilme, taxa de filtração, período de pausa, camada de água parada, manutenção, desinfecção e armazenamento seguro, são os principais itens a serem cuidados.

3.2.1.3 A fonte de água

Podem ser usadas variadas fontes de água no BSF, como água da chuva, águas subterrâneas profundas ou rasas, e águas superficiais de rios e lagos. A fonte deve ser a mais limpa disponível, pois o filtro não é capaz de remover 100% da patógenos e turbidez. Além disso, também não é recomendado o uso de água que contenha cloro.

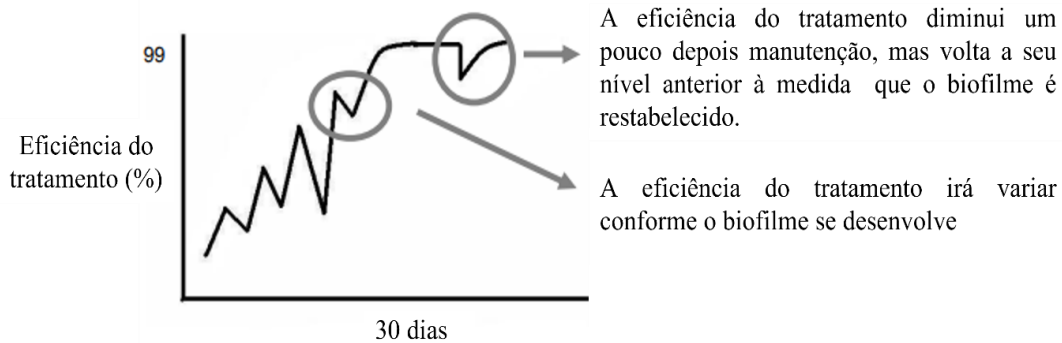
É recomendado manter a mesma fonte de água no BSF, com o objetivo de garantir e manter a eficiência no tratamento. O biofilme pode levar vários dias para se adaptar à nova fonte de água, nível de contaminação e nutrientes presentes. É recomendável utilizar somente fontes de água que apresentem turbidez menor que 50 UNT, pois valores mais elevados podem diminuir a eficiência do filtro e a taxa de filtração.

3.2.1.4 Biofilme

Um componente chave do BSF é o biofilme que se desenvolve na superfície da camada de areia, podendo levar até 30 dias para se formar completamente. Na presença de biofilme, a eficiência do tratamento poderá alcançar remoções de até 99% de patógenos. Na sua ausência, o filtro remove cerca de 30-70% dos patógenos através de aprisionamento mecânico e adsorção. Por isto, enquanto o biofilme estiver se desenvolvendo, é recomendado a aplicação de algum processo de desinfecção. Destaca-se, também, que o desenvolvimento do biofilme aumenta a demanda de oxigênio para o metabolismo dos organismos.

A Figura 3.7 ilustra o funcionamento do biofilme, em termos de porcentagem de eficiência do tratamento em função do tempo. Este processo pode variar em função da qualidade da água da fonte, pois esta influencia o tempo de desenvolvimento do biofilme.

Figura 3.7. Eficiência de tratamento do biofilme em função do tempo.



Fonte: (CAWST, 2012).

3.2.1.5 Taxa de filtração

Attingir um fluxo correto permite o adequado funcionamento do BSF. Deve se evitar vazões de filtração muito rápidas e muito lentas, mais de 0,45 L/min e menos de 0,30 L/min, respectivamente. O BSF foi projetado para permitir uma taxa de filtração em termos de vazão por metro quadrado de área de superficial de areia, que prove ser eficaz em laboratório e testes de campo. As especificações de projeto detalhadas na última versão recomendam que a taxa de filtração não deva exceder a 400 L/h/m².

3.2.1.6 Período de pausa

O BSF é mais eficiente quando operado de forma intermitente e contínua ao longo do tempo. Deve ocorrer um período de pausa que pode variar entre um mínimo de 1 h até um máximo de 48 h. O período de pausa é importante, pois proporciona tempo para que os microrganismos presentes no biofilme consumam os patógenos da água. Se o período de pausa for muito prolongado (mais de 48h), os microrganismos consumirão todos os nutrientes e patógenos presentes e morrerão devido à carência de alimento. Se isto ocorrer, haverá redução na eficiência do filtro. Durante o período de pausa deve ser mantida uma camada de água acima do leito.

3.2.1.7 Camada de água parada

Durante o período de pausa, deve ser mantido um nível de água entre 4 a 6 cm acima da camada de areia. Uma profundidade superior a 6 cm resultará na menor difusão de

oxigênio através da água, gerando um biofilme mais fino e fraco. Em climas quentes, se essa camada parada tiver menos de 4 cm de profundidade, poderá haver evaporação e secagem do biofilme.

3.2.1.8 Manutenção

Com o tempo, os espaços entre os grãos de areia ficarão obstruídos pela retenção de sólidos e crescimento bacteriano, reduzindo a taxa de filtração. Embora a qualidade da água filtrada não seja afetada, a filtração mais lenta poderá ser inconveniente para o usuário, que poderá optar por não usar o filtro. Quando o fluxo se tornar muito mais lento do que a taxa recomendada, o usuário precisará fazer uma manutenção básica (chamada de “agitação e descarga”) para restaurá-lo. Outras atividades de manutenção incluem a limpeza do tubo de saída, do recipiente de armazenamento da água filtrada, do difusor, da tampa e das superfícies externas do filtro.

O processo da manutenção de agitação e descarga tem 8 etapas: i) retirar a tampa do filtro, adicionar água no filtro até ficar por cima do difusor, em seguida, o difusor deve ser retirado do filtro; ii) colocar a mão sobre a camada da areia, especificamente na superfície, depois, agitá-la com movimentos circulares suaves; iii) utilizar um balde pequeno para remover a água suja da parte superior do filtro; iv) descartar a água suja e repetir os primeiros 4 passos duas vezes; v) confirmar se a superfície da camada de areia ficou nivelada; vi) lavar a tampa e o difusor utilizando sabão e água limpa; vii) instalar novamente o difusor no filtro; viii) alimentar o filtro com água e confirmar se o fluxo continua sendo muito mais lento do que a taxa recomendada, se isso acontecer, repetir o processo de manutenção de agitação e descarga até a taxa de filtração seja a recomendada.

3.2.1.9 Desinfecção e armazenamento seguro

Após o processo de filtração, é recomendado que a água ainda seja desinfetada para garantir a sua segurança microbiológica. O BSF remove a maioria, mas não todas as bactérias e vírus presentes na água. Os métodos mais comuns usados em todo o mundo para desinfetar a água potável são: cloração, desinfecção solar (SODIS), desinfecção ultravioleta (UV) e processos de fervura da água, entre outros.

Após o processo de tratamento no ponto de uso com o BSF, a água filtrada deve ser manuseada e armazenada adequadamente para manter a sua qualidade, pois evita que a água volte a ser contaminada. O contato da água com mãos, copos ou qualquer outro elemento contaminado torna a água imprópria para uso. Os recipientes de armazenamento devem ter

as seguintes características: 1) tampa que evite a entrada de objetos; 2) torneira ou abertura estreita para a entrada da água; 3) base estável para evitar quedas; 4) facilidade de limpeza; 5) material duradouro e resistente; 6) não transparentes.

3.2.2 Vantagens e desvantagens do filtro biosand

Dentre as principais vantagens do BSF destaca-se a simplicidade de uso, não requerendo o uso produtos químicos para seu funcionamento. Pode ser construído com materiais locais e de fácil acesso, tendo um custo único de instalação. Apresenta redução documentada de protozoários e bactérias, reduzindo a incidência de doenças, como a diarreia. Uma limitação do BSF influência da turbidez da água bruta, que reduz a eficiência na redução de microrganismos. Outras limitações são o longo tempo de maturação para desenvolvimento do biofilme, a baixa taxa de filtração, a reduzida remoção de vírus. Também é importante ressaltar a dificuldade de sua implementação rápida no local de uso (LOO et al., 2012).

3.3 FLÚOR NO AMBIENTE

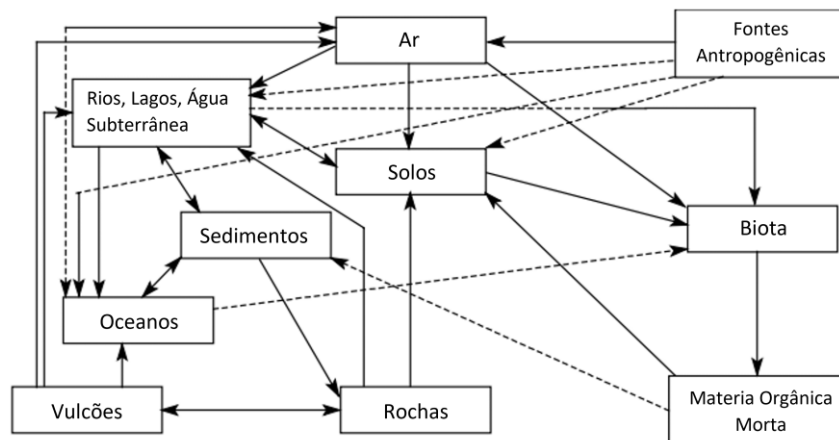
O flúor é um elemento químico de número atômico 9, pertencente ao grupo dos halogênios. É o elemento mais eletronegativo da tabela periódica e o elemento não metálico mais quimicamente energético. Estima-se sua presença na crosta terrestre em 0,065%, sendo mais abundante que cobre e chumbo, mas menos que ferro, alumínio ou magnésio (LENNTECH, 2020). Os compostos cujas moléculas contêm átomos de flúor são amplamente distribuídos na natureza. Muitos minerais contêm pequenas quantidades deste elemento, que pode ser encontrado tanto em rochas ígneas quanto sedimentares (LENNTECH, 2020). O fluoreto (F⁻) é um ânion do flúor, caracterizado por pequeno raio, grande tendência a se comportar como ligante e facilidade para formar diferentes compostos orgânicos e inorgânicos no solo, rochas, ar, plantas e animais. Alguns desses compostos são bastante solúveis em água, de modo que o flúor está presente nas águas superficiais e subterrâneas como um elemento quase completamente dissociado. Assim, a ocorrência de concentrações de flúor em recursos hídricos, águas superficiais e subterrâneas, depende de vários fatores, como pH, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade, dureza e composição geoquímica de aquíferos (HABUDA-STANIĆ et al., 2014).

Pequenas quantidades de flúor estão presentes na água, no ar, nas plantas, nos animais e em diversos ambientes. Como resultado, os humanos são expostos ao composto por meio dos alimentos, da água potável e pela respiração do ar. O flúor pode ser encontrado em qualquer tipo de alimento em quantidades relativamente pequenas. É essencial para manter a

força dos ossos do corpo humano, além de proteger das cáries dentárias. No entanto, a absorção de flúor em excesso causa cáries, osteoporose e danos aos rins, ossos, nervos e músculos, entre outras doenças (LENNTECH, 2020). A presença de fluoretos naturais ou sais fluoretados adicionados na água potável permite sua fácil entrada no corpo através do trato gastrointestinal (HABUDA-STANIĆ et al., 2014).

A Figura 3.8 apresenta o ciclo do flúor através da biogeosfera, assim como o transporte e distribuição entre os ambientes.

Figura 3.8. Ciclo do flúor através da biogeosfera.



Fonte: adaptado de (WHO, 2002)

3.3.1 Vias de exposição aos fluoretos

A exposição total de um indivíduo ao flúor é a soma da exposição aos alimentos e outras fontes consumidas em cada dia. A Organização Mundial de Saúde (OMS) afirma que a exposição total diária é aproximadamente 0,6 mg por adulto por dia em regiões onde não ocorre fluoretação da água para consumo humano, e 2 mg por adulto por dia, em regiões onde a água é fluoretada (WHO, 1984). Devido à grande variabilidade de exposições ao flúor, é difícil controlar a sua ingestão total na dieta. Contudo, é possível reduzir a sua presença na água, quando em concentrações elevadas (WAUGH, 2013).

3.3.1.1 Exposição pela via água

Águas naturais contém fluoretos em diferentes concentrações, uma vez que é um componente comum da crosta terrestre, (MURRAY, 1986). Nos oceanos, as concentrações de fluoreto são da ordem de 1 mg/L. Em rios e lagos, os teores são inferiores a 0,5 mg/L. Em

águas subterrâneas as concentrações de flúor podem chegar até 35 mg/L devido à lixiviação de rochas (FAWELL et al., 2006).

Altas concentrações são esperadas em áreas com presença de rochas ígneas e metamórficas e em águas subterrâneas de aquíferos pobres em cálcio. A concentração elevada de flúor nas águas subterrâneas também está diretamente relacionada com a troca catiônica de sódio por cálcio (FAWELL et al., 2006). Também depende da temperatura, pH, presença ou ausência de complexos minerais, íons precipitados e coloides, solubilidade de minerais, granulometria e tipo da litologia e o tempo e residência das águas (FUNASA, 2018).

3.3.1.2 Exposição pela via ar

Os fluoretos encontram-se distribuídos na atmosfera devido à poluição, originada principalmente da produção industrial de fertilizantes fosfatados, resíduos de queima de carvão e atividade vulcânica (FAWELL et al., 2006). Os teores de fluoreto no ar, em algumas regiões industriais, podem atingir valores da ordem de 1,4 mg F⁻/m³. Em áreas não industriais, a concentração do flúor no ar é normalmente baixa, entre 0,05 e 1,90 µg F⁻/m³ (MURRAY, 1986).

3.3.1.3 Exposição via alimentos e bebidas

As concentrações de fluoretos encontradas na maioria dos alimentos destinados à alimentação humana são relativamente baixas (FAWELL et al., 2006). As concentrações naturais na folhagem da maioria das plantas variam de 2 a 10 mg F⁻/kg. Foram encontradas concentrações de flúor entre 2,0 e 4,3 mg F⁻/kg em cevada, e concentração de 2,1mg F⁻/kg em arroz processado com água não fluoretada e concentração de 6,4 mg F⁻/kg em arroz processado com água fluoretada (MURRAY, 1986).

Em plantas, como taro, inhame e mandioca, que constituem a dieta básica em muitas áreas tropicais, particularmente na América do Sul, foram encontrados níveis relativamente altos de fluoreto. As folhas de chá também podem conter elevadas concentrações deste elemento (MURRAY, 1986).

Quando é usada água fluoretada para a preparação de bebidas quentes, o teor de flúor da bebida pode aumentar até 1,5 mg F⁻/L. Este fenômeno é bastante significativo quando se analisa a ingestão total desta substância na dieta. A ingestão total de um indivíduo que

consuma quatro xícaras de chá por dia, preparado com água fluoretada, excede em 5 mg a dose recomendada de flúor por dia, apenas com a contribuição desta fonte (WAUGH, 2013).

O teor de flúor encontrado em carne é em torno de 0,2 a 1,0 mg F⁻/kg, contudo a carne de frango, pode conter níveis mais elevados. Isso ocorre provavelmente devido aos animais terem sido alimentados com farinha de peixe ou farinha de osso (MURRAY, 1986).

3.3.1.4 Exposição via produtos farmacêuticos e de higiene oral

Um número crescente de produtos farmacêuticos contém fluoretos na forma orgânica ou inorgânica. Produtos como comprimidos de fluoreto de sódio ou pílulas combinadas de fluoreto e vitaminas são usados como um suplemento deste elemento para uso na prevenção da cárie (MURRAY, 1986). Outro produto que contém fluoretos é a pasta dentífrica (1,0 a 1,5 g F⁻/kg) (FAWELL et al., 2006).

3.3.2 Metabolismo do flúor

Os compostos do flúor sofrem dissociação iônica em função do ácido clorídrico produzido no estômago. O íon fluoreto é absorvido, em sua maior parte, pela mucosa estomacal. Por intermédio do plasma sanguíneo, o flúor circula por todo o organismo. O flúor que fica no organismo circula nos fluídos intra e extracelulares, fixando-se nos tecidos duros: ossos e dentes em formação (COUTO, 2018).

3.3.2.1 Absorção

Os compostos de flúor solúveis em água sofrem processos de absorção, após a ingestão. O processo de absorção é rápido e ocorre principalmente no estômago (MURRAY, 1986).

Aproximadamente de 75 a 90% do flúor ingerido é absorvido pela via digestiva. Na mucosa bucal ocorre menos de 1% da absorção. No ambiente ácido do estômago, o fluoreto é convertido em ácido fluorídrico (HF). O fluoreto não absorvido no estômago é absorvido no intestino e não é afetado pelo pH neste local. No entanto, o fluoreto forma complexos insolúveis na presença de grandes concentrações de cátions como o cálcio, magnésio e alumínio, o que pode diminuir a sua absorção gastrointestinal (FAWELL et al., 2006).

3.3.2.2 Distribuição

Após absorvido, o flúor é distribuído pelo sangue para todo o corpo. No sangue, pode apresentar-se na forma iônica ou como compostos orgânicos lipossolúveis (DGS, 2005).

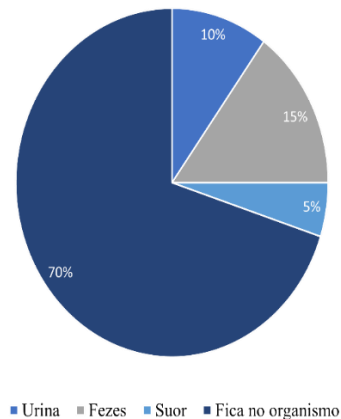
Aproximadamente 99% do flúor consumido pelo corpo humano fica retido em zonas ricas em cálcio como os ossos e dentes, onde se incorpora na rede cristalina, não se acumulando nos tecidos moles do corpo (FAWELL et al., 2006). Nas crianças, cerca de 80-90% do flúor é retido, enquanto nos adultos, esse valor é de 60% (WHO, 1996).

3.3.2.3 Excreção

A eliminação de flúor do corpo humano ocorre após 3 horas do consumo. Aproximadamente 70% do flúor é eliminado pela urina, 15% pelas fezes, 5% pelo suor e 10% fica retida no organismo após o consumo (Figura 3.9). A alimentação e o uso de medicamentos podem afetar o pH da urina e, conseqüentemente, a eliminação e retenção do flúor (FAWELL et al., 2006).

Figura 3.9. Porcentagem de eliminação do teor de flúor no corpo humano, após 3h do consumo.

Eliminação do flúor após 3h de ingestão



Fonte: (FAWELL et al., 2006).

3.3.3 Legislação da fluoretação na água para consumo humano no Brasil

No Brasil, o Ministério da Saúde recomenda a vigilância sanitária da fluoretação das águas para abastecimento público. O Brasil tem uma legislação bem estruturada sobre

fluoretação de águas, fixando uma concentração ideal para consumo humano. No ano 1944, o estado de Rio Grande do Sul (RS) foi pioneiro na implementação de adição de flúor na água de abastecimento público. Em 18 de junho de 1957, foi aprovada a Lei Estadual n° 3125, que estabeleceu a obrigatoriedade da fluoretação em todas as localidades operadas pelo estado e que possuíssem Estação de Tratamento de Água (ETA).

A Lei Federal n° 6.050, de 24 de maio de 1974, dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas de abastecimento quando existir estação de tratamento. Esta lei determina que os projetos de sistemas públicos de abastecimento de água devem incluir previsões e planos relativos à fluoretação da água, bem como devem captar recursos para a aquisição do equipamento e dos produtos necessários à fluoretação.

No Decreto Federal n° 76.872, de 22 de dezembro de 1975, foi estabelecida a utilização de métodos e processos de fluoretação apropriados, nos sistemas em que não existiam estações de tratamento de água. Assim, o Ministério da Saúde é responsável por: a) fixar as condições de obrigatoriedade da fluoretação da água, considerando o teor natural de flúor já existente, b) determinar a viabilidade técnica e econômica da implementação de normas e padrões sobre concentração mínima recomendada e a máxima permitida em função da concentração de íons de fluoreto; c) avaliar métodos de análise e procedimentos para a determinação da concentração de íon fluoreto as águas de consumo público e tipo de equipamento e técnicas a serem utilizadas na fluoretação da água.

Na Tabela 3.5, são apresentados os limites recomendados na Portaria Federal n° 635/Bsb, de 26 de dezembro de 1975. o Ministério da Saúde aprovou as normas e padrões sobre a fluoretação da água em todo o território nacional.

Tabela 3.5. Limites recomendados para a concentração de flúor em águas para consumo humano em função das médias das temperaturas máximas diárias.

Média das temperaturas máximas diárias do ar °C	Limites recomendados para a concentração de íon fluoreto em mg F ⁻ /L		
	Mínimo	Máximo	Ótimo
10,0 – 12,1	0,9	1,7	1,2
12,2 – 14,6	0,8	1,5	1,1
14,7 – 17,7	0,8	1,3	1,0
17,8 – 21,4	0,7	1,2	0,9
21,5 – 26,3	0,7	1,0	0,8
26,4 – 32,5	0,6	0,8	0,6

Fonte: (FUNASA, 2012)

No estado do RS, a Secretaria da Saúde e do Meio Ambiente (SSMA), estabeleceu, por meio da Portaria Estadual n° 15, de 30 de junho de 1989, a obrigatoriedade da fluoretação na água para consumo humano nos sistemas públicos e privados. Dez anos depois, a Secretaria de Estado da Saúde, publicou a Portaria Estadual n° 10, de 16 de agosto de 1999, definindo

a faixa de 0,6 a 0,9 mg/L, como os teores de concentração de íon fluoreto nas águas para consumo humano (RIO GRANDE DO SUL, 1999).

A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil, estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. No artigo 36, parágrafo 1º, especifica que, no caso de adição de flúor (fluoretação), os valores recomendados para concentração de íon fluoreto não podem ultrapassar o máximo valor permitido de 1,5 mg F⁻/L (BRASIL, 2021).

3.3.4 Efeitos da exposição ao flúor na saúde

A exposição dos dentes ao flúor, em concentrações adequadas, aumenta a proteção em relação à aquisição de cáries. Entretanto, concentrações acima de 1,5 mg/L causam fluorose dentária e danos ao esmalte (FAWELL et al., 2006). A fluorose dentária é um efeito cosmético que varia na aparência de apenas discernível a uma mancha marcada ou corrosão dos dentes nas formas graves (WHITFORD et al., 1997). A margem entre os efeitos benéficos do flúor e a ocorrência de fluorose dentária é pequena e os programas de saúde pública buscam alcançar um equilíbrio adequado entre ambos (WHO, 2002).

A fluorose atinge a população de vários países, como Etiópia, Tanzânia, África do Sul, Jordânia, Egito, Argélia, México, Paquistão, Brasil, Sri Lanka, Coreia, Tailândia, Indonésia e Índia (KARUNANITHI; AGARWAL; QANUNGO, 2019). Na maioria das vezes, a população atingida não tem escolha de água para consumo, a não ser àquela com excesso de flúor.

Outro efeito relacionado à elevada concentração de fluoreto na saúde humana, é a fluorose esquelética endêmica, doença que ocorre em diversos lugares da Índia, China e África. Está principalmente associada ao consumo de água contendo níveis elevados de flúor, mas outras fontes de exposição, como poluição do ar com carvão, também podem contribuir para o aparecimento da doença (WHO, 2002). A fluorose esquelética resulta em danos como a osteosclerose, calcificação ligamentar e tendinosa e deformidade óssea extrema. A Tabela 3.6 apresenta os efeitos da exposição ao flúor na saúde.

Tabela 3.6. Concentração de flúor e seus efeitos na saúde humana.

Concentração (mg F⁻/L)	Efeitos na saúde
< 0,5	Propício à cárie dentária.
0,5 - 1,5	Promove o desenvolvimento de ossos e dentes fortes.
1,5 - 4,0	Promove a fluorose dentária em crianças.
> 4	Promove a fluorose dentária e esquelética.
> 10	Fluorose esquelética incapacitante, possivelmente câncer.

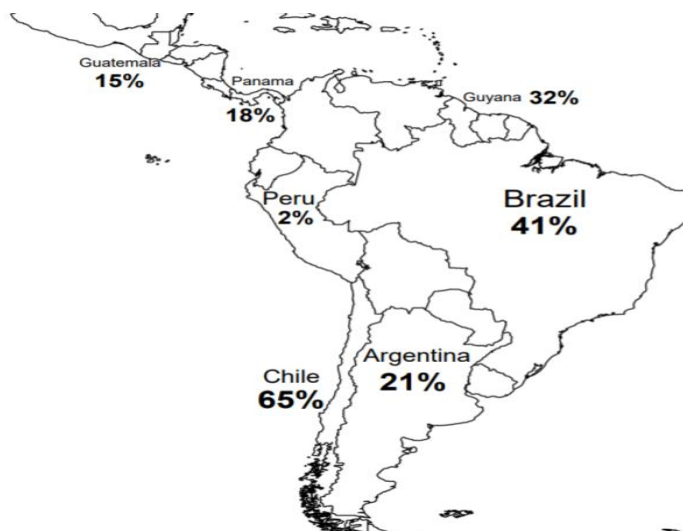
Fonte: (KARUNANITHI; AGARWAL; QANUNGO, 2019)

3.4 FLUORETAÇÃO NA ÁGUA DE ABASTECIMENTO

A fluoretação artificial ocorre quando é flúor é adicionado intencionalmente na água tratada com a finalidade de reduzir a incidência de cárie dentária, principalmente entre crianças e adolescentes. Nas estações de tratamento de água a fluoretação ocorre depois do processo unitário de alcalinização e antes da distribuição final (BSF, 2012).

Segundo estudos desenvolvidos pela British Fluoridation Society e por pesquisadores da Faculdade de Saúde Pública da Universidade Federal de São Paulo (USP), o Brasil conta, atualmente, com o segundo maior sistema de fluoretação do mundo, depois dos Estados Unidos da América (BSF, 2012), considerando a extensão da população nestes dois países. No ano 2008, o número de pessoas abastecidas com água fluoretada artificialmente no Brasil era aproximadamente 73.2 milhões (41% da população). As principais cidades brasileiras com fluoretação artificial incluem São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador, Recife e Manaus. Existem esquemas de fluoretação artificial também em outros países na América do Sul, como Argentina, Chile, Peru e Guayana. A Figura 3.10, apresenta a porcentagem das populações que se estimam como beneficiárias da fluoretação artificial (BSF, 2012).

Figura 3.10. Estimativa dos percentuais das populações beneficiárias da fluoretação artificial em alguns países da América do Sul.



Fonte: (BFS, 2012).

3.4.1 Fluoretação da água nos municípios do estado do Rio Grande do Sul

No ano de 2016, o Centro Estadual de Vigilância em Saúde (CEVS) publicou relatório com os resultados das análises dos teores de fluoreto em amostras de água coletadas em 483 dos 497 municípios do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo 98,96% da população abastecida (CEVS, 2016). O tratamento e distribuição da água nas cidades estudadas são de responsabilidade da Companhia Rio-Grandense de Saneamento (CORSAN), de autarquias municipais, empresas privadas e de prefeituras municipais.

A Tabela 3.7 apresenta os tipos de serviços de abastecimento, as legislações que devem seguir e as concentrações máximas de fluoreto na água para consumo.

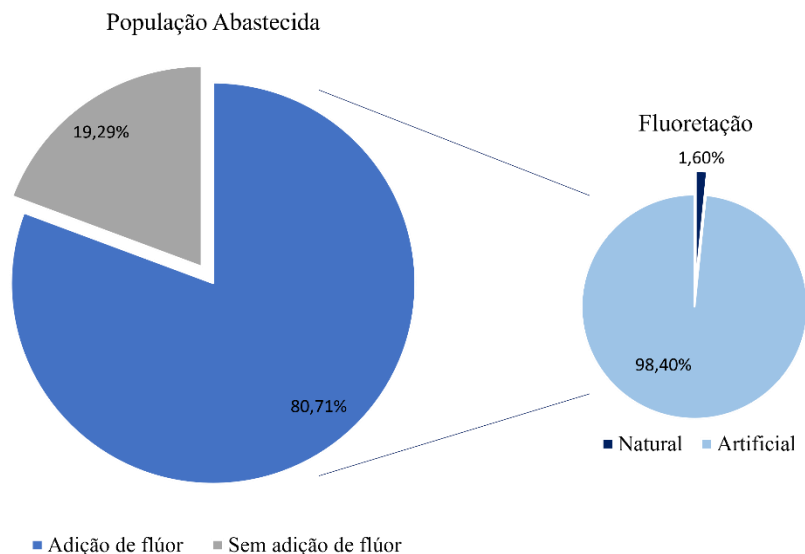
Tabela 3.7. Relação do tipo de serviço de abastecimento de água, a legislação pertinente e teor de fluoreto requerido.

Serviço de abastecimento	Legislação pertinente	Teor de Fluoreto
Sistema de abastecimento de água (SAA)	Portaria Estadual n° 10/1999	Mínimo 0,6 mg/L Máximo 0,9 mg/L
Solução alternativa coletiva (SAC)	Portaria Federal n° 2914/2011	Máximo 1,5 mg/L
Solução alternativa individual (SAI)		

Fonte: (CEVS, 2016)

O referido relatório do CEVS mostrou que, das 53.536 amostras analisadas, 23.388 foram de SAA, enquanto as outras 30.148 amostras corresponderam a SAC e SAI. No entanto, foram somente avaliadas 44.220 amostras, devido às informações disponíveis no Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (SISAGUA), em termos de teor de flúor. Verificou-se que 80,7% da população recebia água com adição de flúor. Deste percentual, 1,6% recebiam água fluoretada naturalmente e 98,4% de forma artificial (Figura 3.11).

Figura 3.11. Relação da população abastecida e o tipo de fluoretação da água.



Fonte: (CEVS, 2016)

A classificação das amostras analisadas foi feita considerando os teores de fluoreto medidos na água de abastecimento. As amostras com concentrações de fluoreto consideradas “adequadas” foram àquelas cujos resultados das análises atendiam a norma legal relacionada àquela fonte, considerando o tipo do sistema (SAA, SAC ou SAI). Da mesma forma, as amostras foram classificadas como “acima” quando os resultados das análises apontaram concentrações superiores àquelas estabelecidas pela portaria. A classificação de “abaixo” somente foi possível de ser empregada para amostra proveniente de Sistema de Abastecimento Individual, tendo em vista que a Portaria Estadual estabelece uma concentração mínima do íon fluoreto presente na água a ser distribuída à população (Tabela 3.8) (CEVS, 2016).

Tabela 3.8. Relação das possibilidades de classificação de cada amostra, com as diferentes fontes de abastecimento de água e a classificação, de acordo com o teor de fluoreto existente.

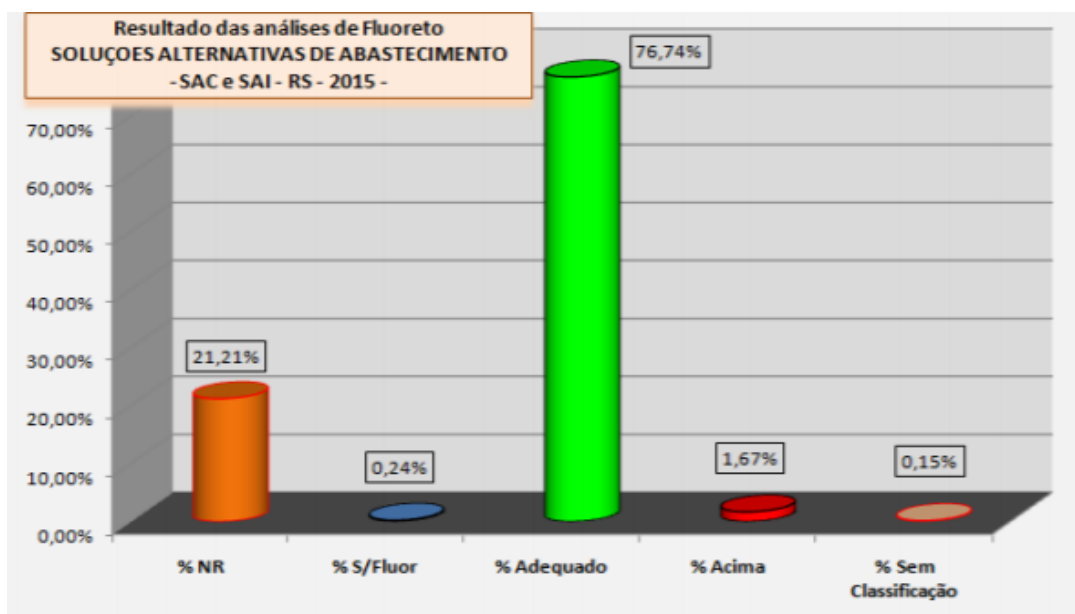
Critério de classificação das amostras de acordo com a origem da água e o teor de fluoreto encontrado, segundo a legislação vigente					
Fonte / Teor de Fluoreto (mg/L)	< 0,10	> 0,10 < 0,6	> 0,6 < 0,9	> 0,9 < 1,5	> 1,5
SAA	Sem Flúor	Abaixo	Adequado	Acima	Acima
SAC	Sem Flúor	Adequado	Adequado	Adequado	Acima
SAI	Sem Flúor	Adequado	Adequado	Adequado	Acima
Não Informado	Sem Flúor	Sem Classificação	Adequado	Sem Classificação	Acima

Fonte: (CEVS, 2016)

A população residente no estado de Rio Grande do Sul, estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano 2014, era de 11.207.274 habitantes. Segundo o relatório de cobertura de abastecimento no estado de RS, 2,44% da população (273.703 habitantes) era abastecida apenas por SAI, 6,75% da população (756.754 habitantes) era abastecida apenas por SAC e 81,89% (9.177.305 habitantes) eram abastecidos por SAA. Não havia informação sobre o sistema de abastecimento utilizado para 999.512 habitantes (CEVS, 2016).

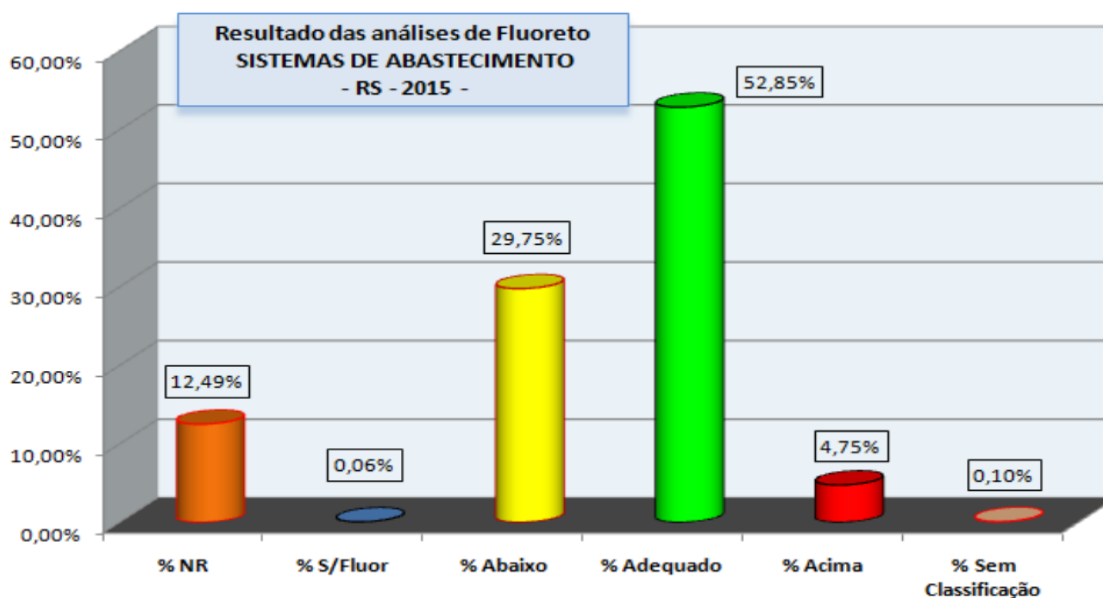
Segundo o CEVS (2016), do total de 1.030.457 habitantes do estado do RS que implementam o SAC ou SAI como sistema de abastecimento, 1,67% da população (17.208 habitantes) e tem acesso a água com concentrações de flúor acima dos padrões estabelecidos pela normatividade vigente (Figura 3.12). Na Figura 3.13 são apresentados os valores do SAA, 4,75% da população (435.922 habitantes) consomem água com concentrações de flúor acima dos valores da normatividade.

Figura 3.12. Total das amostras de água das Soluções Alternativas Coletivas (SAC) e Soluções Alternativas Individuais (SAI) de abastecimento não realizadas e analisadas, agrupadas pela classificação do teor de fluoreto, no ano de 2015.



%NR: Porcentagem de análises não realizadas, %S/Flúor: Porcentagem de análises sem flúor.
Fonte: (CEVS, 2016)

Figura 3.13. Total das amostras do Sistema de abastecimento de água (SAA), não realizadas e analisadas, agrupadas pela classificação do teor de fluoreto, no ano de 2015.



%NR: Porcentagem de análises não realizadas, %S/Flúor: Porcentagem de análises sem flúor.
Fonte: (CEVS, 2016)

Diversos métodos têm sido aplicados visando a remoção do excesso de fluoreto em água de abastecimento humano, como a coagulação e precipitação, processos de membrana, adsorção, tratamentos eletroquímicos e troca iônica. O processo de adsorção é geralmente aceito como o método mais barato e eficaz para remoção de flúor da água (HABUDA-STANIĆ et al., 2014).

Segundo Shinzato *et al.*, (2018) apresentaram e analisaram os principais tipos de tratamento, visando a remoção do excesso de íons fluoreto. Avaliaram o tratamento por adsorção, utilizando alumina ativada, carvão ativado e biocarvão, resinas sintéticas, hidróxidos duplos lamelares e zeólitas, assim como materiais alternativos como nano partículas. Também citaram o tratamento químico, tratamento por fitorremediação e o tratamento por membranas, como a osmose reversa e eletrodialise.

O processo de adsorção envolve a passagem de água através de um leito de contato onde o flúor é removido por troca iônica ou reação química de superfície com a matriz de leito sólido. A saturação da coluna ocorre após um período de operação, e há necessidade de sua regeneração.

Os adsorventes usados incluem alumina ativada, carvão ósseo e resinas de troca iônica sintéticas (FEENSTRA; VASAK; GRIFFIOEN, 2007). A adsorção é geralmente considerada uma alternativa viável para a remoção de fluoreto de águas, pois associam elevadas taxas de remoção a baixos custos operacionais. Nesse sentido, nos últimos anos a atenção dos cientistas tem sido focada ao estudo de diferentes tipos de materiais adsorventes naturais ou sintéticos (COSTA et al., 2013). O sistema de desfluoretação pelo processo de adsorção com carvão de osso é recomendado para o tratamento de água em pontos de uso, tais como bebedouros, torneiras de cozinha e outros locais onde o uso da água destina-se para consumo direto (COSTA et al., 2004).

A Tabela 3.9 apresenta a aplicabilidade de métodos de tratamento de água para remoção de flúor associados a projetos unifamiliares, comunidades, baixo custo e alta remoção de flúor. O tratamento por orvalho solar foi desenvolvido pela Solar Dew no ano 2007. Trata-se de uma membrana porosa que purifica a água utilizando a energia proveniente do sol.

Tabela 3.9. Relação da aplicabilidade dos métodos para as situações de uso doméstico unifamiliar, comunidades, baixo custo e alta remoção de flúor.

Método	Doméstico + Baixo Custo	Comunidades + Baixo Custo	Doméstico + Alta Remoção de Flúor	Comunidades + Alta Remoção de Flúor
Alumina ativada				
Troca iônica				
Osiose inversa				
Eletrodiálise				
Processo nalgonda				
Precipitação por contato				
Carvão de osso				
Argila calcinada				
Orvalho solar				

	método muito adequado
	método com adequação média
	método não muito adequado

Fonte: (FEENSTRA; VASAK; GRIFFIOEN, 2007).

3.4.2 Processo de adsorção

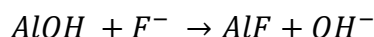
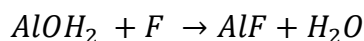
A adsorção de flúor no adsorvente sólido geralmente ocorre através de três fases: i) transporte de íons de flúor para a superfície externa do adsorvente através da camada limite ao redor da partícula; ii) adsorção de íons fluoreto nas superfícies das partículas; iii) troca entre os íons de flúor com os elementos estruturais dentro do adsorvente, ou sua transferência para as superfícies internas dos materiais porosos (HABUDA-STANIĆ et al., 2014).

Estudos de adsorção apontaram as características mais importantes da implementação adequada na prática: capacidade de adsorção, seletividade para íons de flúor, regenerabilidade, compatibilidade, tamanho de partículas e poros e custo. No entanto, a eficiência de remoção de flúor sempre dependerá da qualidade da água bruta, da concentração inicial de flúor, pH, temperatura, tempo de contato e dosagem adsorvente (BHATNAGAR et al., 2011) (TOMAR; DINESH, 2013).

3.4.2.1 Alumina ativada como material de adsorção

A adsorção em alumina ativada (AA) é uma tecnologia de tratamento aplicável tanto ao nível doméstico quanto comunitário (SHINZATO et al., 2018). A alumina ativada é um grão de óxido de alumínio (Al_2O_3) preparado para ter uma superfície adsorviva. Quando a água passa por uma coluna de alumina ativada, poluentes e outros componentes na água são adsorvidos na superfície dos grãos (KARUNANITHI; AGARWAL; QANUNGO, 2019).

A superfície da alumina ativada é anfotérica por natureza, conseguindo reagir com comportamento ácido ou básico, além de existir nas formas de AlOH^+ , AlOH e AlO^- . A ligação do flúor a alumina ativada é possível devido à troca de grupos hidroxila de superfície, que podem ser representados pelas seguintes reações:



A adsorção de fluoreto pela alumina ativada varia em função do pH da solução, que influencia as interações eletrostáticas entre a superfície da alumina e as espécies de fluoreto dominantes na solução. A alumina ativada apresenta alta capacidade de remoção de flúor, chegando a 1560 mg/kg, em pH de solução entre 4,0 e 6,0 (HABUDA-STANIĆ et al., 2014).

Diversos estudos mostram que a adsorção de fluoreto na AA é um processo complexo, e que é influenciado pela morfologia e tamanho da superfície da partícula, pH, temperatura, concentração de flúor e a presença de outros íons como sulfatos e bicarbonatos. Todos estes fatores interagem e fazem variar as taxas de adsorção da AA. O estudo desenvolvido por Tomar; Dinesh (2013) concluiu que a remoção máxima de flúor ocorre a uma temperatura de 25°C e pH 5–6. Em pH mais baixos, a adsorção de flúor diminuiu devido à formação preferencial de espécies solúveis de AlF_x . Já para pH mais altos, as OH^- deslocam F^- do sólido $\text{Al}(\text{OH})_3$, reduzindo a eficiência.

A desfluoretação da água usando alumina ativada, é uma metodologia capaz de remover fluoreto de pequenas volumes de água, sendo um método utilizado tanto em países industrializados como em desenvolvimento, nos casos em que se requer altas eficiências de remoção e capacidade comprovada (FUNASA, 2010).

3.4.2.2 Argila calcinada como material de adsorção

A argila é um material sedimentar terroso composta principalmente de partículas finas de silicato de alumínio hidratado e outros minerais e impurezas. A argila em pó e a calcinada

são capazes de adsorver flúor e outros poluentes da água. Entretanto, a capacidade de adsorção de flúor na argila é relativamente baixa. Também, a cinética da adsorção do flúor à argila é demorada (KARUNANITHI; AGARWAL; QANUNGO, 2019) (FAWELL et al., 2006). De acordo com Feenstra; Vasak; Griffioen (2007), as eficiências de remoção de flúor pela argila situam-se na faixa entre 60 – 70%. Se argila estiver disponível localmente e esta faixa de remoção de flúor for suficiente, é uma alternativa de tratamento de baixo custo a ser considerada.

3.4.2.3 Carvão de osso como material de adsorção

O carvão de osso (BC) é obtido pelo processo de ativação física a elevadas temperaturas, sob condições controladas, proporcionando uma alta área superficial, formada por poros distribuídos uniformemente. É considerado um dos melhores adsorventes conhecidos (BONECHAR, 2022).

Costa *et al.* (2008) avaliaram a utilização de carvão ativado de osso como meio adsorvente para reduzir o excesso de íons fluoreto em águas subterrâneas. Identificaram um aumento da concentração de alguns íons na água tratada, como carbonatos, fósforo, sódio e potássio, sem comprometer, no entanto, a qualidade da água para consumo. Em estudo seguinte, estes autores demonstraram a eficiência do carvão ativado de osso na remoção de flúor em altas concentrações ($\leq 3,8$ mg/L) (COSTA et al., 2013). Concluíram que, para atender as necessidades de consumo de uma família de cinco pessoas durante seis meses, seria preciso 3,5 kg do carvão de osso ativado.

Pappis *et al.* (2017) realizaram monitoramento da qualidade da água tratada de um sistema de 5 filtros idênticos, cada um preenchido com 6 kg de carvão ativado de osso bovino de diâmetro de 20 x 60 mesh e capacidade de adsorção de 1000 mg/g. O carvão de osso foi utilizado como material adsorvente para remoção de flúor em águas subterrâneas na cidade de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul, especificamente em poços artesianos com concentração de fluoretos entre 2,3 e 3,4 mg/L. Os resultados obtidos pelos autores confirmam a alta eficiência em termos de remoção, tratando em média $15,398 \pm 3,487$ litros de água e atingindo os valores máximos permitidos estabelecidos na portaria nº 2914/2011. Os autores concluíram que a adsorção em carvão de osso pode ser utilizada para uso coletivo, por exemplo, em escolas e universidades.

3.4.3 Critérios de avaliação das tecnologias de tratamento

Devido as diferentes características das populações que precisam de tratamento visando remover flúor na água de consumo, deve ser feita uma análise das comunidades, em termos sociais, econômicos, condições técnicas e condições ambientais, com o intuito de escolher a metodologia mais adequada para cada população. Ao mesmo tempo, deve ser feita uma análise das diferentes características das tecnologias de tratamento em termos de custos de implementação, operação e manutenção, eficiência, casos de sucesso, qualidade da água afluyente do tratamento, entre outras características (FEENSTRA; VASAK; GRIFFIOEN, 2007). A Tabela 3.10 apresenta uma comparação entre os métodos de desfluoretação da água com maior potencial de aplicação em países em desenvolvimento com indicações de aspectos positivos e negativos em relação a diversas variáveis.

Tabela 3.10. Comparação dos métodos de desfluoretação com maior potencial de aplicação em países em desenvolvimento.

Vantagens	Métodos de desfluoretação				
	BC	CP	Nal	AA	Cl
Sem dosagem diária de produtos químicos.	+	-	-	+	+
Dosagem projetada para a concentração real de flúor. Independente da unidade ou planta.	-	+	+	-	-
Sem risco de falso tratamento devido ao ponto de ruptura.	-	+	+	-	-
A capacidade de remoção do meio é independente da concentração de flúor.	-	+	-	-	-
Nenhuma regeneração ou renovação do meio é necessária.	-	+	+	-	-
Alta eficiência de remoção pode ser garantida.	+	+	-	+	-
Fácil de construir pelos próprios usuários.	+	+	++	+	+
Os materiais de construção são baratos e amplamente disponíveis.	+	+	++	+	+
Pode ser dimensionado para uma pessoa, famílias ou um grupo de pessoas, por exemplo, uma escola.	+	++	+	+	-
Sem risco de inaceitabilidade do meio/produtos químicos.	-	-/+	+	+	-
Sem risco de deterioração da qualidade original da água.	-/+	+	-/+	-/+	-

BC: carvão de osso (Bone Carbon); CP: precipitação por contato (Contact Precipitation); Nal: nalgonda; AA: alumina ativada, Cl: argila calcinada (Calcined Clay); +: vantagens, -: desvantagens.

Fonte: (FEENSTRA; VASAK; GRIFFIOEN, 2007).

4 METODOLOGIA

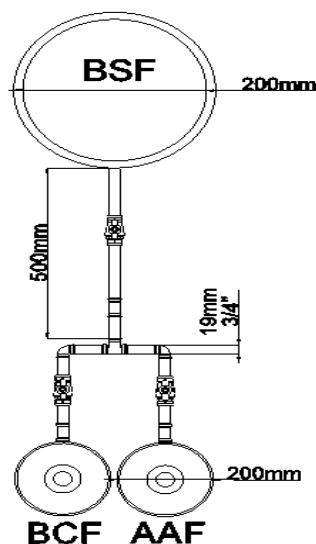
Considerando os objetivos do estudo e a fundamentação teórica descrita no capítulo 3, foi projetado, implementado e operado um sistema de tratamento com filtro biosand (BSF) seguido por dois filtros, em paralelo, com carvão ativado de osso (BCF) e alumina ativada (AAF). Dois sistemas iguais foram instalados e operados simultaneamente. O BSF foi usado como tecnologia potencial para a remoção de turbidez e microrganismos da água, enquanto os filtros BCF e AAF foram implementados a fim de comparar as suas eficiências de remoção dos teores de flúor da água contaminada.

As atividades da pesquisa foram desenvolvidas no Laboratório de Saneamento do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), vinculado ao Núcleo de Estudos em Saneamento Ambiental (NESA).

4.1 PROJETO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

O sistema de tratamento foi composto por um filtro biosand (BSF) conectado em serie a um filtro de carvão de osso (BCF) e a um filtro de alumina ativada (AAF), instalados em paralelo (Figura 4.1). Os sistemas foram construídos em duplicata, para um total de 3 filtros, visando obter dados mais robustos para a análise estatística. Foram mantidas as características idênticas em termos de materiais, dimensionamento, instalação, tempo e metodologia de operação dos sistemas.

Figura 4.1. Vista superior do sistema completo formado por o BSF, BCF e AAF.



Fonte: própria do autor.

4.1.1 Materiais usados para construção dos filtros

Os principais materiais usados para a construção e instalação do sistema completo em duplicata são apresentados na Tabela 4.1. No Anexo 8.1 são apresentados todos os materiais e ferramentas utilizados no desenvolvimento do estudo.

Tabela 4.1. Materiais e ferramentas usadas para construção e instalação dos dois sistemas paralelos do BSF, BCF e AAF.

Materiais e ferramentas	
Descrição	Quantidade
Peneira 12,5mm ($\pm 1/2''$)	1 unidade
Peneira 6,35mm ($\pm 1/4''$)	1 unidade
Peneira 0,7mm ($\pm 0,03''$)	1 unidade
Difusor	3 unidades
Tampa do difusor	3 unidades
Areia regular grossa (areia de filtração < 0,7 mm)	10 sacos de 20 kg
Brita 00 (cascalho de separação 0,7 - 6 mm)	1 saco de 20 kg
Brita 01 (cascalho de drenagem 6 - 12 mm)	1 saco de 20 kg
Carvão de osso (Bonechar - Carvão Ativado do Brasil LTDA)	13 kg
Alumina ativada (Aquapro Purificação de Águas)	18 kg

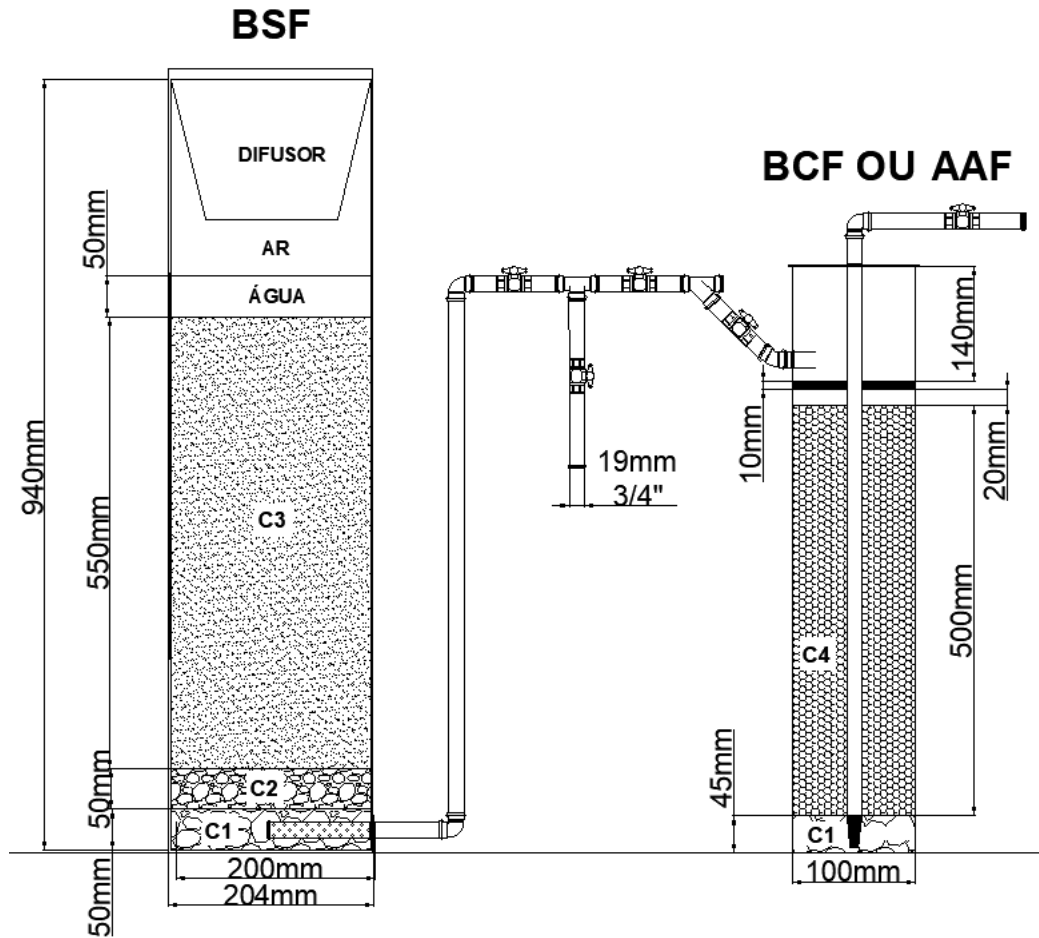
Fonte: própria do autor

4.1.2 Montagem do sistema completo

A instalação do BSF baseou-se na metodologia proposta pelo CAWST (CAWST, 2012). No entanto, o sistema teve duas pequenas modificações quanto aos materiais recomendados pelo CAWST e os efetivamente empregados no presente trabalho, bem como em relação ao seu tamanho: 1) O desenho original recomenda o uso de cimento como material de estrutura do BSF, mas utilizou-se PVC; 2) O diâmetro recomendado é de 340 mm, mas o

diâmetro utilizado foi de 204 mm. Os AAF e BCF operaram com filtração descendente e fluxo de filtração ascendente. A Figura 4.2 apresenta a vista lateral do sistema construído.

Figura 4.2. Vista lateral das camadas internas e as alturas do desenho no BSF, BCF e AAF.



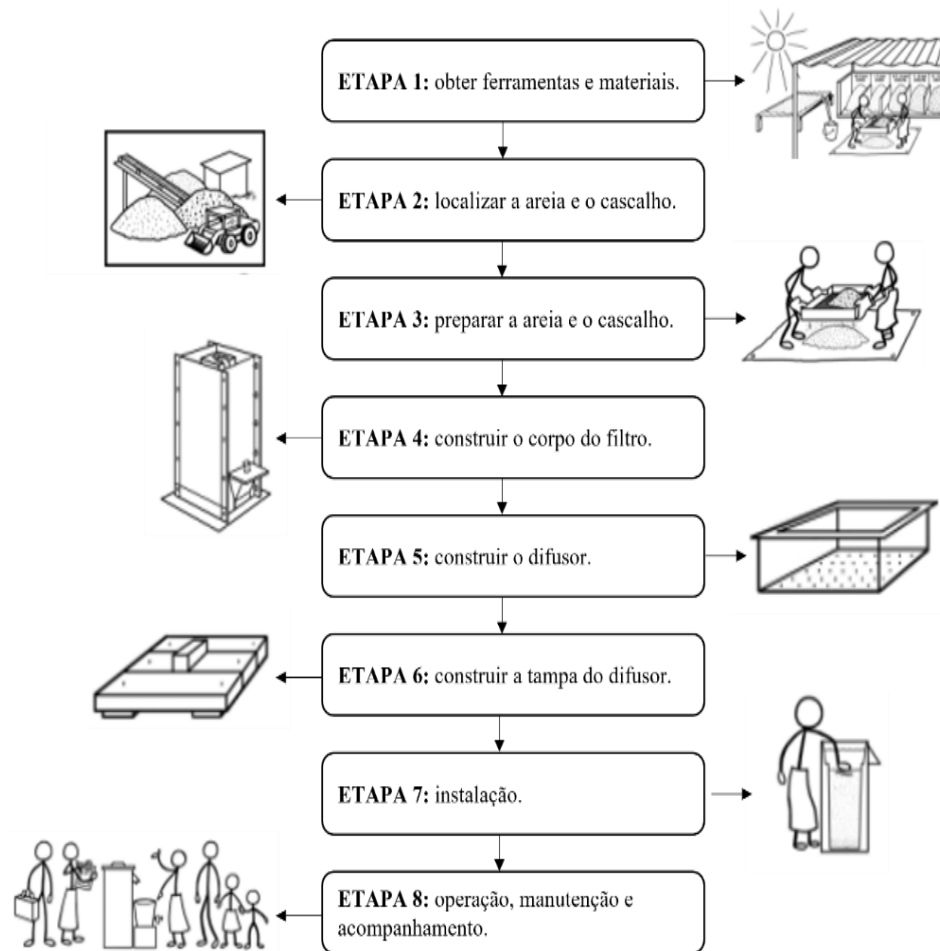
C1: camada de cascalho de drenagem, C2: camada de cascalho de separação, C3: camada de areia de filtração, C4: camada de filtração de alumina ativada ou carvão de osso.

Fonte: própria do autor.

4.1.3 Filtro biosand

A utilização do filtro biosand, desde a construção até a operação e manutenção, envolve uma sequência de 8 etapas, conforme mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3. Sequência de etapas para utilização do filtro biosand.



Fonte: (CAWST, 2012)

4.1.3.1 Preparação da areia e o cascalho

Após a execução das duas primeiras etapas, juntar as ferramentas e obter a areia e o cascalho, foi feita a preparação das camadas do material filtrante do BSF (Figura 4.4). A areia e o cascalho foram expostos ao sol com o objetivo de realizar a primeira secagem. Depois disso, esses materiais passaram por três peneiras com diferentes granulometrias.

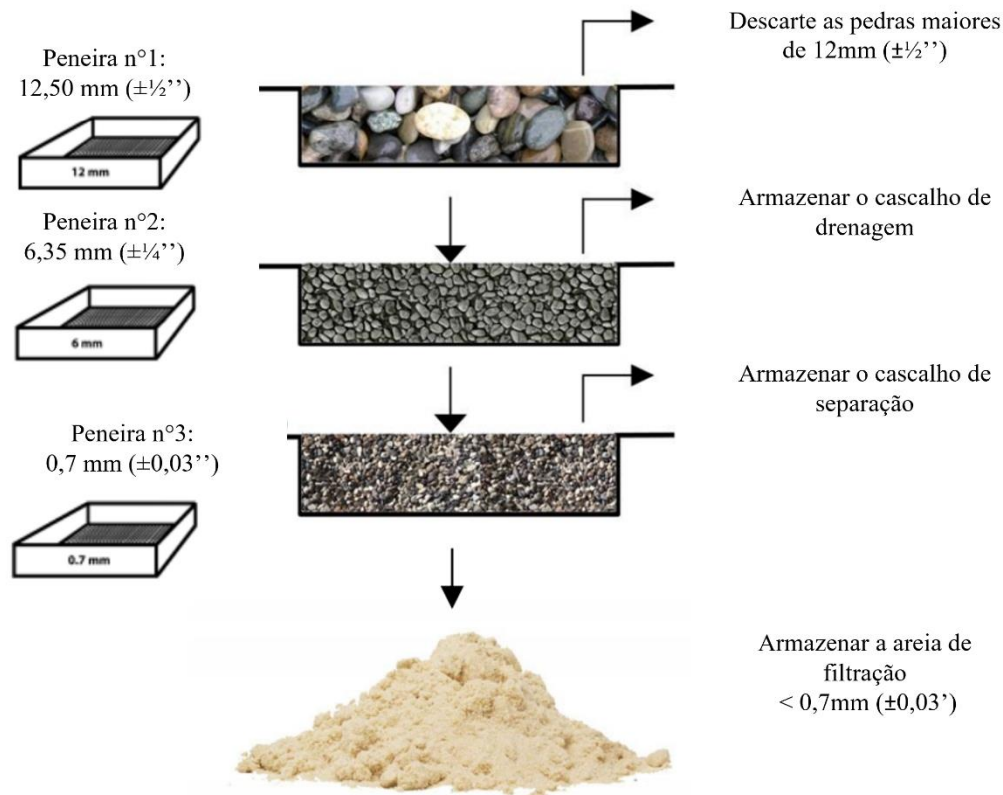
Figura 4.4. Preparação do material filtrante do BSF: a) cascalho de drenagem depois de exposto ao sol, b) areia de filtração no processo de secagem ao sol, c) diferença da granulometria do cascalho de filtração e drenagem, d) peneiras utilizadas para separação.



Fonte: própria do autor.

A areia e o cascalho foram passados, separadamente, por uma peneira de 12,50 mm ($\pm 1/2''$). Os materiais acima desta granulometria foram descartados, uma vez que não são usados no filtro biosand. O material que passou pela peneira de 12,50 mm foi encaminhado para a peneira de 6,35 mm ($\pm 1/4''$). O cascalho que permaneceu na superfície desta peneira foi armazenado para ser utilizado como o cascalho de drenagem. Na sequência, o restante do material foi passado pela peneira de 0,7 mm ($\pm 0,03''$). O material retido por esta granulometria foi utilizado como cascalho de separação, enquanto aquele passou pela peneira foi utilizado como areia de filtração (Figura 4.5).

Figura 4.5. Esquema de separação do cascalho de drenagem e separação e areia de filtração usados no BSF.



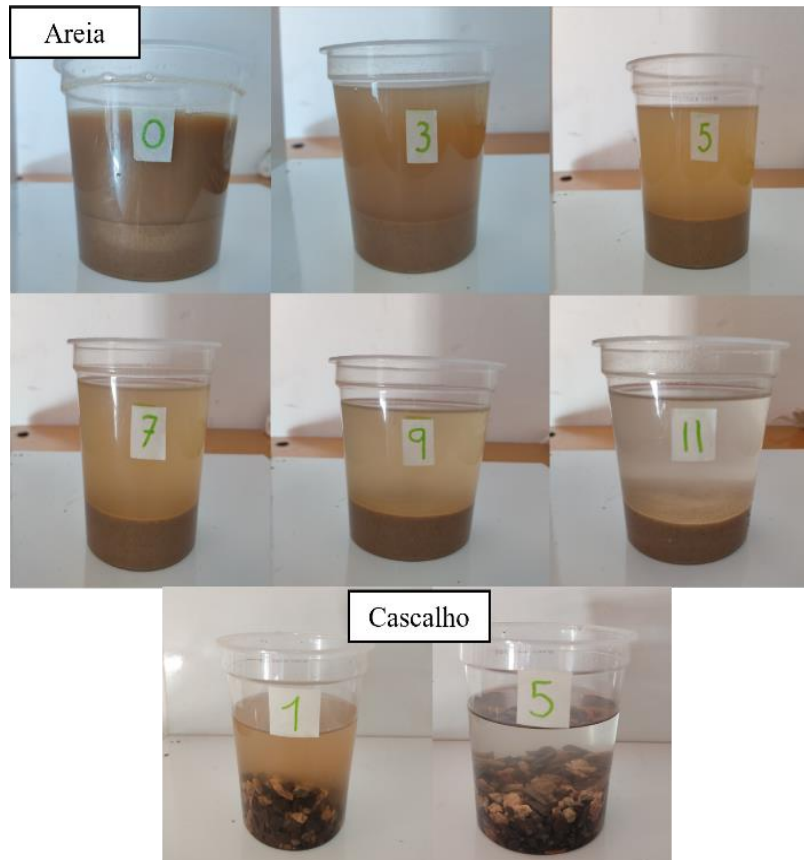
Fonte: adaptado do (CAWST, 2012)

Após obter às três camadas do material filtrante, foi realizado o processo de lavagem. Para isto, foi adicionado, em um balde, a quantidade de areia para atingir, aproximadamente, 5 cm de altura. Em sequência, foi acrescentada água limpa da torneira até a metade do balde. A mistura de areia e água foi submetida a agitação manual, seguindo-se o repouso por 1 min. Posteriormente a água sobrenadante do balde era descartada, cuidando-se para não perder grandes quantidades de areia. Esse processo foi realizado em 9 repetições, até se obter o resultado necessário para cumprir com as características descritas por CAWST (2012).

Para verificar se a areia estava suficientemente limpa, foi realizado o teste da garrafa descrito por CAWST (2012). Foi adicionada uma pequena quantidade de areia a um recipiente transparente, em seguida, este foi preenchido com água. A mistura foi submetida a agitação manual por aproximadamente 1 min. Finalmente, deixou-se decantar a mistura por aproximadamente 4 segundos. No momento em que a superfície da areia pode ser vista separada da superfície da água, o material foi considerado pronto para uso. Isto ocorreu após 9 lavagens para a areia, pois na lavagem 11 a areia ficou mais limpa do necessário, para o cascalho, foram necessárias 5 lavagens, pois é recomendado deixar o material de drenagem

e separação o mais limpo possível. A Figura 4.6 ilustra diferentes repetições da lavagem. Por fim, os três materiais, areia de filtração, cascalho de separação e cascalho de drenagem, foram expostos ao sol visando a secagem final.

Figura 4.6. Teste da garrafa para preparar a areia de filtração, o cascalhos separação e de drenagem.



Fonte: própria do autor.

4.1.3.2 Construção do corpo do filtro

Foram instalados 2 filtros com características de projeto e construção idênticas, por causa da duplicata. Na parte inferior dos BSF, instalou-se um sistema de drenagem com o objetivo de impedir perdas de cascalho e areia dos filtros. A Figura 4.7 apresenta detalhes dos filtros.

Figura 4.7. Construção dos BSF: a) corpo do filtro, instalados em duplicata, b) mecanismo de drenagem instalado na parte inferior do BSF, c) tubulação de saída do BSF, conectado ao sistema de drenagem do filtro.

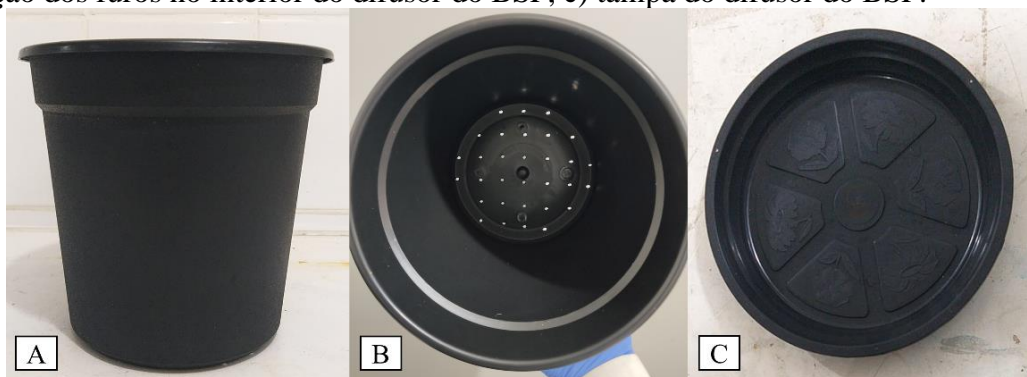


Fonte: própria do autor.

4.1.3.3 Construção do difusor e tampa

O difusor e a tampa são itens importantes para a construção do BSF. O difusor tem como objetivo proteger a superfície da areia de revolvimento quando a água é despejada no filtro, protegendo o biofilme. Ele também garante que a água seja distribuída uniformemente na superfície da areia. Os furos do difusor devem estar separados por 2,5 cm de distância e devem ter aproximadamente 3 mm (1/8") de diâmetro para evitar a desestabilização da areia. Furos menores restringem o fluxo através do filtro, causando ineficiências no processo de filtração. A tampa do difusor tem o objetivo de impedir o acesso de elementos externos no interior do filtro. A Figura 4.8 ilustra os difusores e a tampa do BSF.

Figura 4.8. Difusor e tampa do difusor: a) difusor antes de ser instalado no BSF, b) distribuição dos furos no interior do difusor do BSF, c) tampa do difusor do BSF.



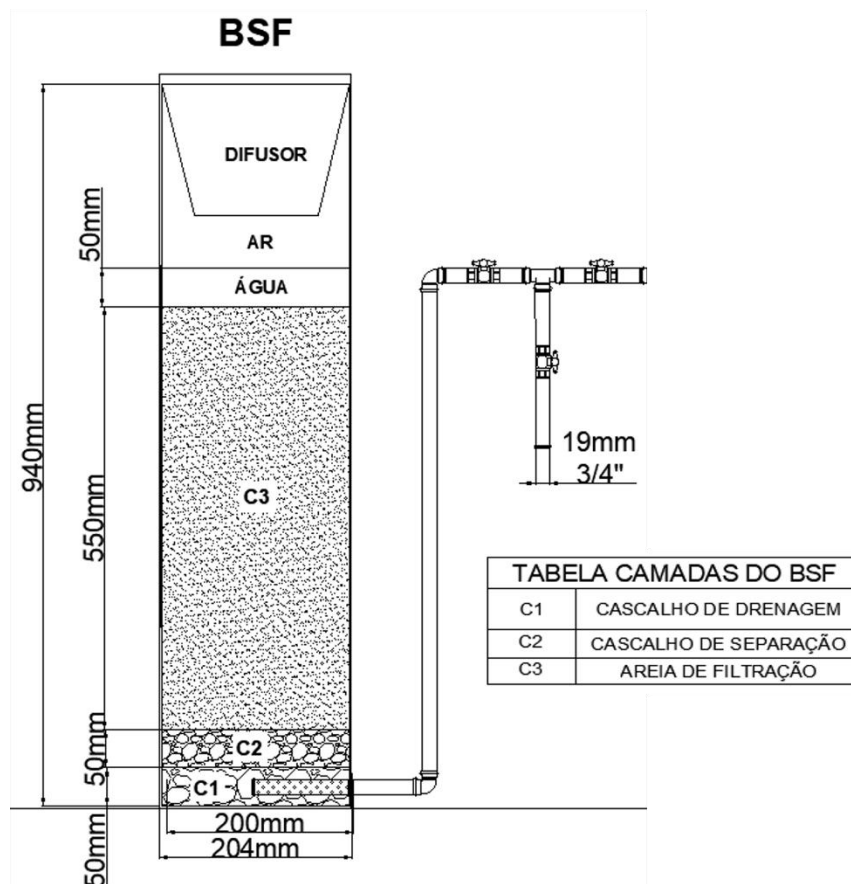
Fonte: própria do autor.

4.1.3.4 Instalação do filtro biosand

Antes da operação do BSF, testou-se a estanqueidade hidráulica do sistema, para identificar possíveis vazamentos. A seguir, o filtro foi preenchido com água até a superfície, ajustando-se o fluxo de filtração para aproximadamente 1 L/min. Ao término da filtração, a superfície da água estava abaixo do difusor. O filtro foi instalado protegido da luz solar e da chuva, em superfície plana, nivelada e de fácil acesso.

A instalação do BSF teve por base a metodologia proposta pelo Centre for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST, 2012). No entanto, o sistema foi construído com tubos e peças de PVC, materiais de fácil acesso. Além disso, também adaptaram-se algumas medidas diferentes em termos de distribuição das camadas e diâmetro da estrutura do filtro, conforme já descrito no item 4.1.2.

Figura 4.9. Vista lateral do interior do BSF especificando as camadas internas com as respectivas dimensões.



Fonte: própria do autor.

Depois de instalado os BSF, foram verificadas as vazões iniciais dos dois sistemas, BSF1 e BSF2, resultando 360 ml/min e 310ml/min respectivamente. Estas vazões comprovam

que o sistema foi instalado corretamente pois, se a vazão obtida fosse inferior a 300 ml/min, seria indicativo de que a areia não foi suficientemente lavada. No entanto, se a vazão fosse superior a 400 ml/min, significaria que a areia foi lavada muitas vezes, sendo necessária uma troca de toda a areia no filtro instalado.

Finalmente, os BSF foram lavados com o objetivo de remover impurezas e sedimentos finos que poderiam estar ainda presentes na areia e no cascalho. A lavagem foi realizada até que a água na saída do filtro estivesse limpa visualmente. Foram necessários 20 litros de água para a lavagem final de cada BSF.

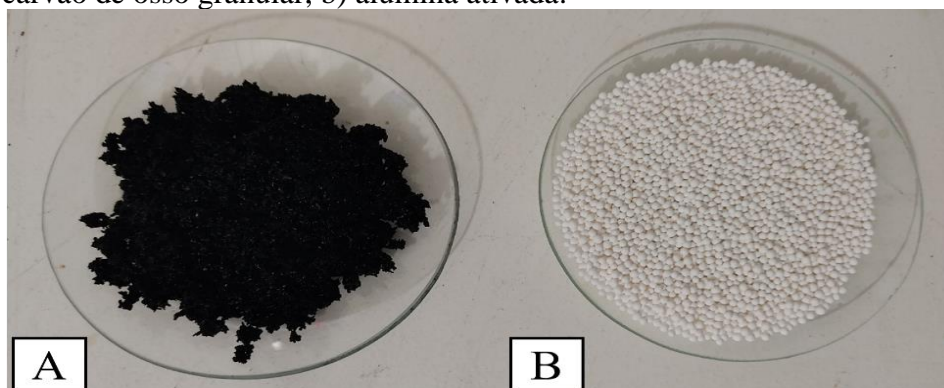
4.1.4 Filtro de carvão de osso e alumina ativada

A instalação do filtro AAF e BCF baseiam-se nos sistemas de filtração descendente com fluxo da água tratada ascendente. Os filtros de carvão de osso e alumina ativada foram instalados de forma independente, sem mistura dos dois materiais adsorventes. Foram construídos dois conjuntos em paralelo, cada um recebendo os filtrados dos biosand.

Para o BCF, foi adquirido o carvão de osso granular com diâmetro de partícula 0,85 mm x 0,30 mm. O carvão foi manufaturado pela empresa Bonechar Carvão Ativado do Brasil, localizada em Maringá, Paraná, a partir de osso bovino.

Para o AAF, foi adquirida a alumina ativada da empresa Aquapro Purificação de Águas Eireli Me, localizada na cidade de Campo Largo, no estado de Paraná. Foi utilizada alumina ativada com granulometria de 1,0 mm a 1,6 mm. A Figura 4.10 apresenta os materiais adsorventes usados no sistema.

Figura 4.10. Materiais adsorventes utilizados no sistema de tratamento para remoção de flúor: a) carvão de osso granular, b) alumina ativada.



Fonte: própria do autor.

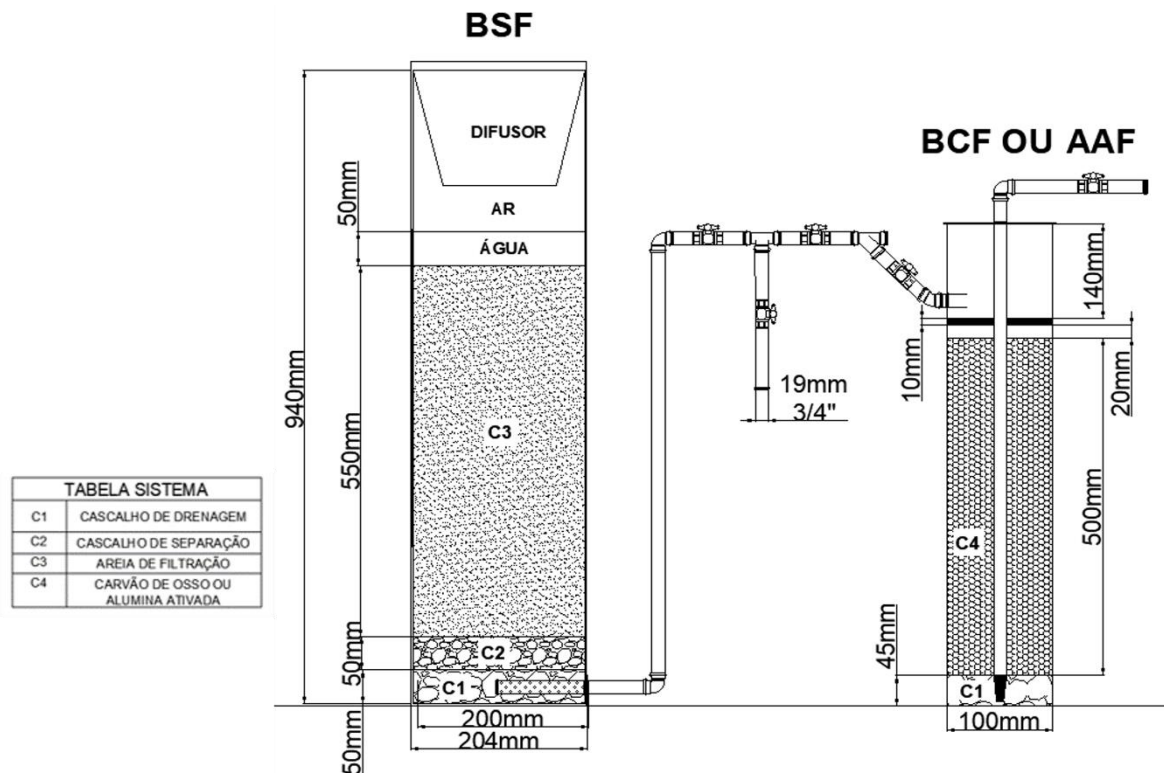
4.1.4.1 Preparação dos materiais adsorventes

Seguindo orientação das empresas, o carvão e a alumina foram lavados com água deionizada antes de serem colocadas nos filtros. A lavagem tinha o objetivo de remover partículas finas e possíveis impurezas acumuladas desde a sua produção e transporte até o local de utilização dos materiais.

4.1.4.2 Construção e instalação dos filtros

Como já mencionado, foram instalados 2 filtros em paralelo, um preenchido com alumina ativada e o outro com carvão de osso. Ambos possuíam características construtivas idênticas, já que havia o objetivo de avaliar as diferenças nas remoções de flúor e custos de aplicação. A Figura 4.11 apresenta a vista lateral do sistema de tratamento completo e suas dimensões.

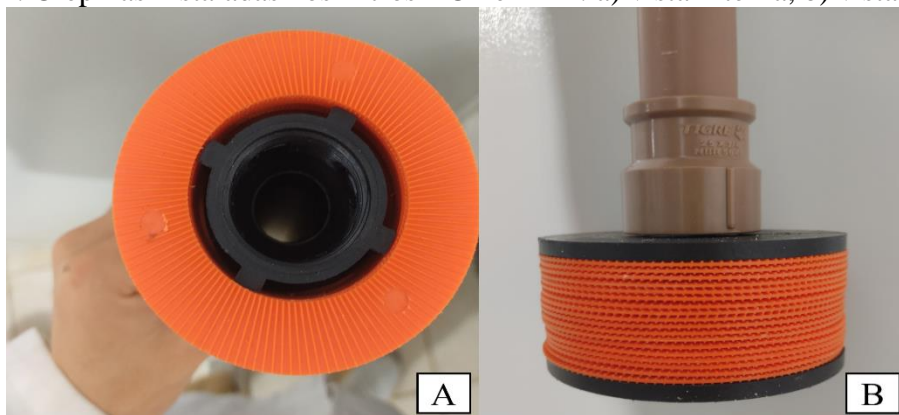
Figura 4.11. Vista lateral das camadas internas do BSF, AAF e BCF com as respectivas dimensões.



Fonte: própria do autor.

O AAF e BCF foram construídos de PVC, como o BSF. O líquido tinha um fluxo de filtração descendente e fluxo ascendente da água tratada. Na parte inferior de cada um dos filtros AAF e BCF encontravam-se crepinas, que tinham o objetivo de impedir a passagem de sólidos (Figura 4.12). As crepinas eram da marca Pluvitec, da empresa Hidro Solo, localizada na cidade de Maceió, Alagoas.

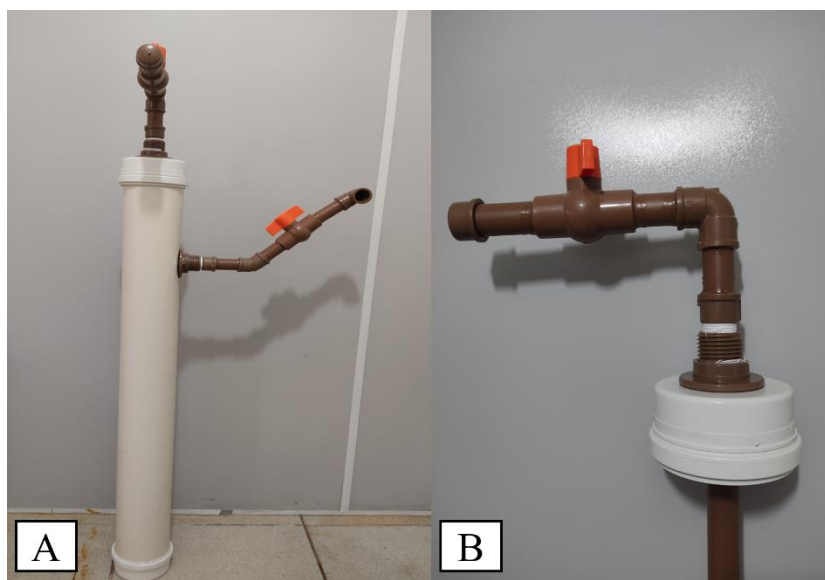
Figura 4.12. Crepinas instaladas nos filtros BCF e AAF: a) vista interna, b) vista lateral.



Fonte: própria do autor.

O AAF e BCF tinham no interior, uma tubulação que permitia a passagem da água tratada em fluxo descendente, para depois, devido as diferenças de pressão, sair do sistema pela tubulação de fluxo ascendente (Figura 4.13).

Figura 4.13. Filtros AAF e BCF instalados: a) corpo dos AAF e BCF, b) sistema de tubulação de saída.



Fonte: própria do autor.

4.2 PREPARAÇÃO DA ÁGUA AFLUENTE AO FILTRO BIOSAND

A água usada nos ensaios foi preparada utilizando-se água de torneira declorada, onde foram adicionadas bactérias, turbidez e fluoreto. As concentrações finais excediam os valores especificados pela Portaria GM/MS No 888/2021, que dispõe sobre a qualidade da água para consumo humano no Brasil.

O processo da preparação de 100 litros da água do estudo foi realizado duas vezes por semana. Esse volume de água era utilizado no sistema de tratamento, seguindo a metodologia apontada na Figura 4.14.

Figura 4.14. Sequência de ações para preparação de água bruta.

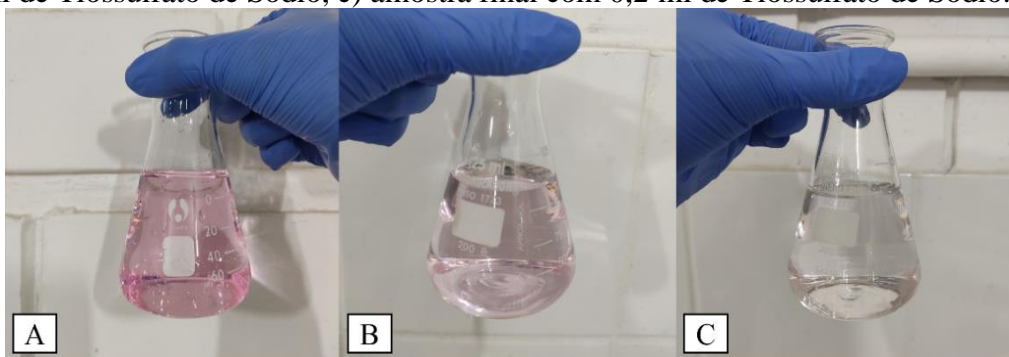


Fonte: própria do autor.

4.2.1 Inativação do cloro

O primeiro passo era determinar a concentração de Tiosulfato de Sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) necessária para neutralizar o cloro presente na água da torneira. Semanalmente, foram desenvolvidos ensaios para determinar a relação de volume de solução de Tiosulfato de Sódio ao 5% por volume de água da torneira (Figura 4.15). A concentração de cloro na água da torneira era medida seguindo a metodologia analítica 4500-Cl Chloride residual, DPD Ferrous Titrimetric Method (APHA; AWWA; WEF, 2017). O Tiosulfato de Sódio utilizado era da empresa Dinâmica Química Contemporânea Ltda, pureza de 100%.

Figura 4.15. Processo de titulação para decloração da água: a) amostra bruta, b) amostra com 0,1 ml de Tiosulfato de Sódio, c) amostra final com 0,2 ml de Tiosulfato de Sódio.



Fonte: própria do autor.

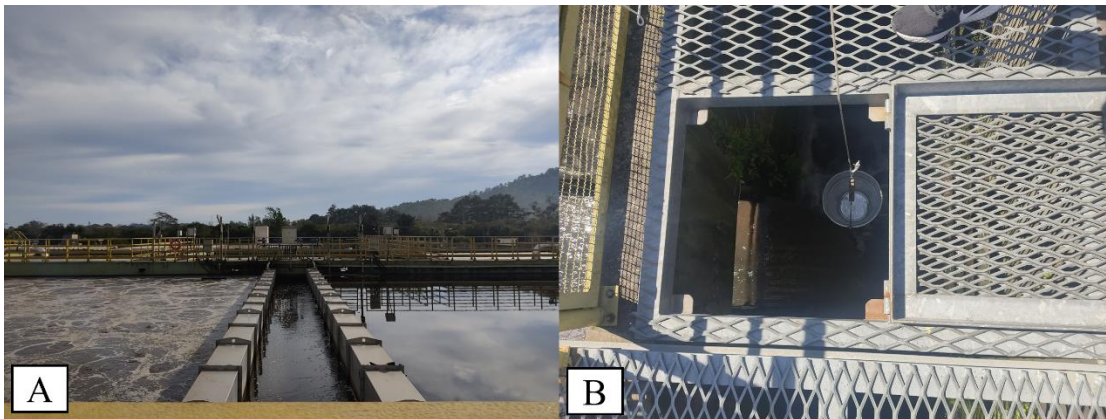
4.2.2 Adição de microrganismos de esgotos

Após a remoção do cloro na água da torneira, vinha a etapa de contaminá-la com microrganismos. Para isto, misturava-se esgoto tratado coletado no vertedor do decantador secundário da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) São João Navegantes (Figura 4.16), localizada na cidade de Porto Alegre, RS.

Para o preparo semanal da água empregada nos testes, foi utilizada a proporção 20:80 de efluente e água declorada. Antes da mistura, passou-se o efluente em filtro quantitativo, a fim de remover eventuais sólidos de maior tamanho.

A quantificação de *E. coli* e coliformes totais na água foi realizada com a metodologia do substrato definido, usando o teste Colilert (IDEXX, 2021).

Figura 4.16. Coleta de esgotos tratados na ETE São João Navegantes: a) decantador secundário, b) local exato de coleta do esgoto tratado.



Fonte: própria do autor.

4.2.3 Adição de turbidez

Foi utilizada a turbidez de 25 UNT na água afluyente ao sistema por meio da adição de caulinita. Foram realizados ensaios com massas de caulinita entre 0,01g e 0,1 g no mesmo dia da preparação da água bruta, com o objetivo de manter a turbidez estável no sistema, uma vez que esse parâmetro pode sofrer alteração no efluente secundário.

Para a realização dos ensaios, utilizou-se equipamento de Jar-Test da marca Velp e modelo F.6/S. Inseriu-se 1 L de amostras em cada jarro, que foram mantidas sob agitação (Figura 4.17) durante 5 min a 20 r.p.m. Em seguida, alíquotas de cada jarro foram

encaminhadas para leitura no turbidímetro da marca HACH e modelo 2100N. A leitura de cada amostra era efetuada em triplicata, durante cada análise.

A caulinita usada era da empresa Labsynth Produtos para Laboratórios Ltda, pureza de 100%. A medição de turbidez seguiu a metodologia analítica 2130 B – Método Nefelométrico (APHA; AWWA; WEF, 2017) medida no turbidímetro da marca HACH e modelo 2100N, calibrado previamente com os padrões de turbidez de 0,2; 2 e 20 UNT.

Figura 4.17. Amostras da água com adição de caulinita sob agitação no equipamento Jar-Test.



Fonte: própria do autor.

4.2.4 Adição de flúor

No presente trabalho, estabeleceu-se utilizar a concentração de 20 mg F⁻/L na água a ser utilizada nos testes, devido aos valores encontrados na prática, especificamente em águas subterrâneas no estado RS, para isso, foram desenvolvidos ensaios em Jar-Test para estimar a quantidade de fluoreto de sódio (NaF) a ser adicionada. Assim como na adição de caulinita, para ajuste da turbidez, as amostras foram inseridas em cada jarro, mantidas sob agitação durante 5 min a 20 r.p.m. e testou-se massas de fluoreto de sódio entre 0,02 mg e 0,1 mg em 1L de água bruta. Em seguida, as amostras foram analisadas.

Para determinação do flúor, foi empregado o método analítico 4110 B – Cromatografia Iônica com Supressão Química da Condutividade do Eluente (APHA; AWWA; WEF, 2017). As medidas foram feitas no equipamento Eco IC da METROHM-Cromatógrafo iônico e ICS-3000 da DIONEX-Cromatógrafo iônico (DIONEX, 2008) (METROHM, 2021). Foi utilizada a coluna analítica Metrosep A supp5® para a análise do fluoreto como ânion e, como fase móvel, uma solução de carbonato de sódio 3,2 mmol/L e

bicarbonato de sódio 1,0 mmol/L com modo de eluição isocrática e com vazão de 1,0 mL/min (METROHM, 2021). Foi utilizado NaF da empresa Vetec Química Fina Ltda.

4.3 OPERAÇÃO DO SISTEMA COMPLETO DE TRATAMENTO

A operação do sistema completo tem início no BSF com a alimentação de ± 12 L de água bruta previamente preparada com as características físicas, químicas e biológicas requeridas. Todas as válvulas do sistema encontravam-se fechadas no início da operação. A água bruta passava pelo processo de filtração lenta no BSF e, quando atingida a pressão necessária, a válvula 1 era aberta com o objetivo de coletar 400 ml de amostra que passou pelo BSF. Em sequência, as válvulas 2, 3 e 4 eram abertas para permitir o ingresso da água proveniente do BSF no AAF e BCF. A água oriunda do BSF passava pelo processo de filtração descendente no AAF e BCF, sendo a abertura das válvulas 5 e 6 reguladas conforme a velocidade de filtração. Eram coletados 300 ml nas saídas do filtro BCF e AAF. A Figura 4.18 apresenta o sistema completo dos filtros.

Figura 4.18. Vista lateral do sistema de tratamento completo: a) visual do BSF e filtro de alumina ativada, b) visual do BSF e filtro de carvão de osso.

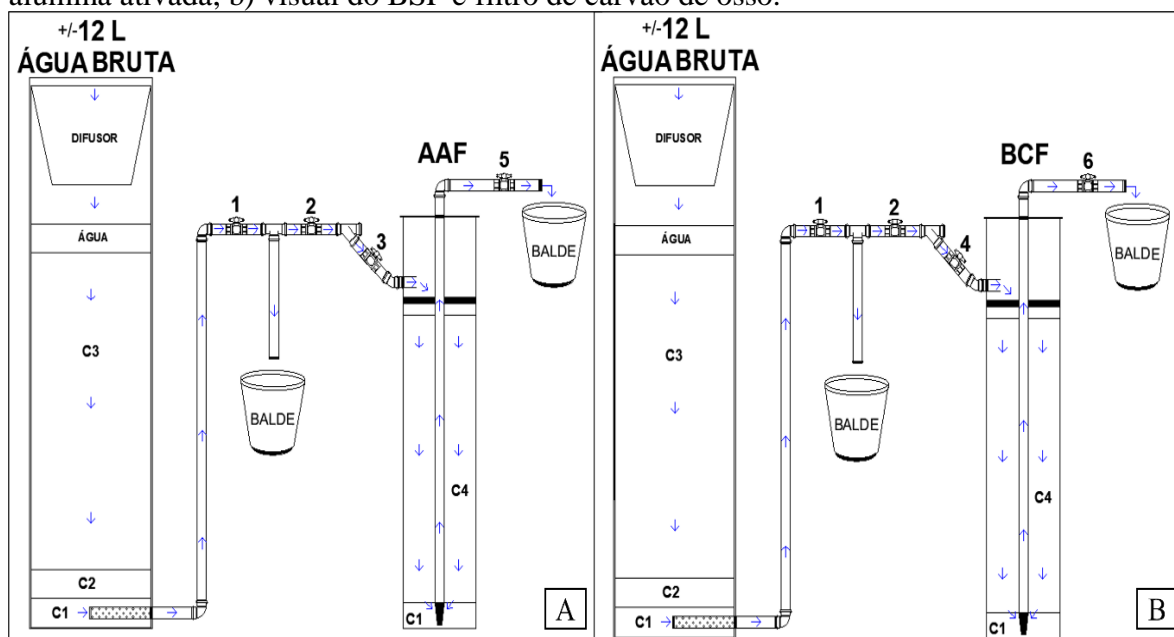


TABELA SISTEMA	
C1	CASCALHO DE DRENAGEM
C2	CASCALHO DE SEPARAÇÃO
C3	AREIA DE FILTRAÇÃO
C4	CARVÃO DE OSSO OU ALUMINA ATIVADA

Fonte: própria do autor.

Antes da coleta das amostras efluentes do BSF, AAF e BCF, eram descartados os primeiros 100 ml dos efluentes. Os 400 ml de amostra do efluente do BSF e os 300 ml das amostras efluentes do filtro AAF e BCF, eram utilizados para as medições dos parâmetros, pH, temperatura, turbidez, condutividade elétrica e fluoreto, coliformes totais, *E. coli*, alcalinidade e Carbono Orgânico Total (COT).

4.3.1 Tempo de operação do sistema de tratamento completo

As atividades semanais incluíam a coleta do esgoto tratado na ETE São João Navegantes e a preparação da água usada nos filtros. Do início até o fim do experimento foram desenvolvidas análises físicas, químicas e biológicas, com o objetivo de caracterizar o efluente do sistema completo e de cada filtro (BSF, AAF, BCF). Algumas análises tiveram periodicidade diária e outras semanal, como mostrado na Figura 4.19.

Figura 4.19. Atividades e análises físicas e químicas realizadas ao longo das semanas.



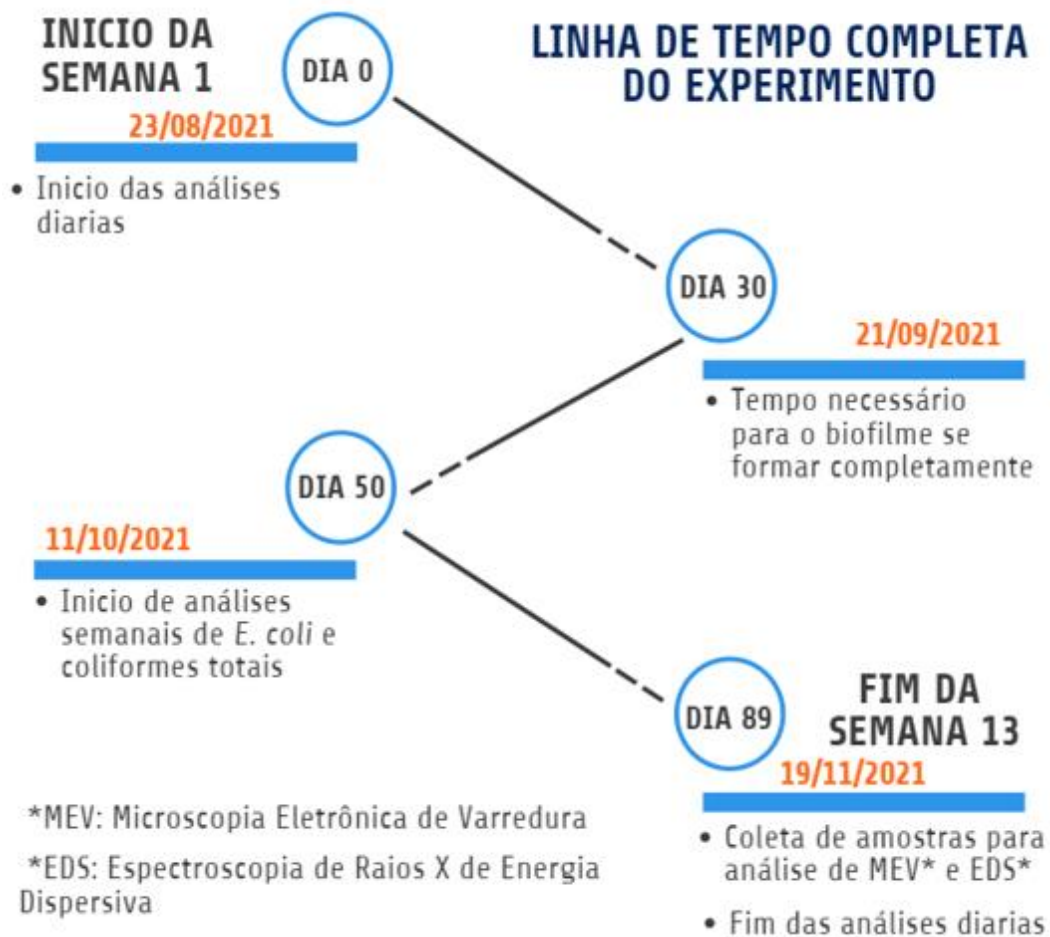
Fonte: própria do autor.

Durante o período de 89 dias, o sistema foi operado com volume afluente de água bruta constante (± 12 L) e com 24 h como único tempo de pausa, de sábado a domingo. A taxa de filtração manteve-se estável durante os primeiros 30 dias de operação do sistema completo. As vazões médias foram, 250 ml/min, 130 ml/min e 120 ml/min, respectivamente, para o filtro BSF, AAF e BCF.

O sistema manteve-se em operação constante até o dia 53, quando foram realizadas as primeiras análises para avaliar a remoção de coliformes totais e *E. coli*. A partir deste dia, foram feitas análises semanais até o fim do experimento. Era esperado que o biofilme tivesse se desenvolvido até o dia 30 desde o início da operação. O atraso nas análises de *E. coli* e coliformes totais deveu-se a defeito na autoclave.

Transcorridos 89 dias de operação, foram coletadas amostras de areia, alumina ativada e carvão de osso para análises com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva (EDS). Os objetivos foram: 1º) visualizar o crescimento do biofilme nos diferentes materiais adsorventes e 2º) identificar os elementos presentes nas amostras. A Figura 4.20 apresenta a linha do tempo do experimento.

Figura 4.20. Linha de tempo do experimento do sistema de tratamento com o BSF, AAF e BCF.



Fonte: própria do autor.

4.4 MONITORAMENTO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

As análises de monitoramento foram realizadas conforme as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). Todos os parâmetros descritos na Tabela 4.2 foram analisados nas amostras efluentes dos filtros biosand dos sistemas 1 e 2 (BSF1 e BSF2), do filtro de alumina ativada dos sistemas 1 e 2 (AAF1 e AAF2) e filtro de carvão de osso sistemas 1, e 2 (BCF1 e BCF2).

Tabela 4.2. Parâmetros, métodos analíticos e equipamentos utilizados nos ensaios físico, químicos e biológicos.

Parâmetro	Método analítico	Equipamento
Alcalinidade	2320 B - Método de Titulação	pHmetro DM-22 da DIGIMED, bureta volumétrica e ácido sulfúrico padronizado
Biofilme	Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise química por EDS	Microscópio da marca FEI modelo Inspect F50
Coliformes Totais	9223 B - Teste de substrato enzimático	Colilert, Quanti-Tray/2000
Condutividade	2510 B - Método Laboratorial	Condutímetro de campo KASVI, modelo K53-001
Carbono Orgânico Total	5310 B - Método de Combustão de Alta Temperatura	TOC-LCPH da SHIMADZU
<i>E.coli</i>	9223 B - Teste de substrato enzimático	Colilert, Quanti-Tray/2000
Fluoreto	4110 B - Cromatografia Iônica com Supressão Química da Condutividade do Efluente	Eco IC da Metrohm-Cromatógrafo iônico e ICS-3000 da DIONEX
pH	4500-H+B - Método Eletrométrico	pHmetro de campo KASVI, modelo K39-0014PA
Temperatura da água	2550 B - Métodos Laboratoriais e de Campo	pHmetro de campo KASVI, modelo K39-0014PA
Turbidez	2130 B - Método Nefelométrico	Turbidímetro 2100N da HACH

Fonte: própria do autor.

4.4.1 Alcalinidade

A alcalinidade foi avaliada pelo método da titulação com ácido sulfúrico (H₂SO₄). O ácido de 0,02N era previamente padronizado. Eram adicionados 100 ml de amostra em um Becker, sendo o ácido adicionado por uma bureta. O Becker permanecia sob agitação com auxílio de barra e agitador magnético. A amostra era titulada até atingir o pH 4,5, utilizando-se pHmetro. A alcalinidade foi calculada utilizando-se a Equação 4.1.

$$\text{Alcalinidade} = \frac{V_{AS} * 0,02 * f * 50.000}{V_A} \quad (4.1)$$

Onde: Alcalinidade: mg/L CaCO₃; V_{AS}: volume de ácido sulfúrico (mL); f: fator de correção de 1,014 ; V_A: volume de amostra (mL)

4.4.2 Biofilme

Os biofilmes foram analisados no Centro de Microscopia Eletrônica e Microanálise (CEMM) do Centro de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (IDEA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) em Porto Alegre.

4.4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

No final do experimento, dia 89, foram coletadas 10 amostras, assim distribuídas: 1º) areia limpa (MEV1), 2º) areia da camada superficial dos BSF (MEV2), 3º) areia a 1 cm abaixo da camada superficial dos BSF (MEV3), 4º) areia a 20 cm abaixo da camada superficial dos BSF (MEV4), 5º) alumina ativada limpa (MEV5), 6º) alumina ativada da camada superficial dos AAF (MEV6), 7º) alumina ativada do fundo dos AAF (MEV7), 8º) carvão de osso limpo (MEV8), 9º) carvão de osso da camada superficial dos BCF (MEV9) e 10º) carvão de osso do fundo dos BCF (MEV10). Cada amostra foi imersa na solução de fixação dentro de tubo de eppendorf de 1,5 ml de volume, deixando-se fixar por um período de 8 dias. Após a etapa de fixação, as amostras passaram por 3 lavagens de 30 min cada com uma solução tampão fosfato 0,2 mol/L e água destilada na proporção de 1:1.

Para observação no MEV, as amostras foram submetidas a 4 etapas de preparação: fixação, desidratação, dessecação em ponto crítico e metalização.

A etapa de fixação tem como objetivo manter o formato da amostra original, desde o momento da amostragem até o final. Preparou-se a solução fixadora com 12% de glutaraldeído, em 25% e 38% de água deionizada e 50% de tampão fosfato 0,2 mol/L. Este último, foi preparado com fosfato de sódio bibásico anidro (P.M: 141,96) e fosfato de sódionobásico anidro 98% (P.M: 119,98), ambos da marca NEON e 100% de pureza. Foram pesados ± 24 g de fosfato de sódio monobásico e ± 28 g de fosfato de sódio bibásico, para depois ser dissolvidos com água deionizada em um balão de 1 L cada. Em seguida, foram adicionados ± 700 ml de solução de fosfato de sódio bibásico em um Becker de 1 L. A seguir, era adicionada solução de fosfato de sódio monobásico até o pH da solução se estabilizar entre os valores de 7,2 a 7,4.

A segunda etapa correspondeu a desidratação das amostras. Foram realizadas 7 lavagens utilizando etanol absoluto da marca MERCK. A Tabela 4.3 apresenta os volumes de etanol, água deionizada e tempo de imersão em cada uma das lavagens.

Tabela 4.3. Volumes de etanol, água deionizada e tempos de imersão usado em cada lavagem.

Número de lavagem	Volume de etanol (%)	Volume de água deionizada (%)	Tempo de imersão (min)
1	30	70	10
2	50	50	10
3	70	30	10
4	90	10	10
5	90	20	20
6	100	10	10
7	100	20	20

Fonte: própria do autor.

As lavagens 1 até 3 promoveram a desidratação das amostras, tendo sido realizadas no Laboratório de Saneamento (LABSAN) do IPH. As lavagens 4 a 7, foram feitas no CEMM do IDEA. A partir da quarta lavagem, as amostras passam pelo processo do ponto crítico, seguindo-se a dessecação e metalização. O ponto crítico é realizado no equipamento BALZERS CPD030, onde o etanol absoluto é substituído por dióxido de carbono líquido. A pressão e a temperatura do equipamento são aumentadas até alcançar o ponto crítico, quando a amostra fica completamente seca para seguir ao processo de metalização, no equipamento da marca Quorum modelo Q 150R ES plus.

A dessecação das 9 amostras, foi feita com a fixação em fita de carbono sobre os stubs. Finalmente, na quarta etapa era feita a metalização das amostras.

As 10 amostras foram observadas no Microscópio Eletrônico de Varredura FEI modelo Inspect F50, operando a uma tensão de 20.00 kV. As imagens foram geradas em magnitudes de 70 x, 100 x, 200 x, 500 x, 1000 x e 2000 x.

4.4.2.2 Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva (EDS)

A técnica de EDS tem aplicação no estudo da composição química de partículas de diferentes materiais, assim como na análise da distribuição da concentração de elementos químicos em uma amostra heterogênea. A técnica de EDS precisa seguir o mesmo procedimento de 4 etapas da MEV (fixação, desidratação, dessecação em ponto crítico e metalização).

A análise qualitativa baseia-se na identificação de elementos presentes na amostra, determinando as energias dos picos presentes no espectro e na comparação com energias conhecidas de emissão de raios X descritas nas tabelas anteriormente estudadas e estabelecidas por diferentes autores.

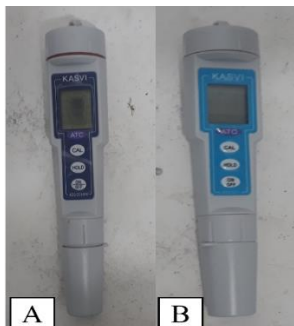
O processo de análise foi feito pelos técnicos do CEMM do IDEA nas amostras representativas dos três materiais envolvidos no experimento. Assim, as análises de EDS foram realizadas nas amostras de areia limpa, areia da camada superficial dos BSF, alumina ativada limpa e do fundo do AAF, carvão de osso limpo e do fundo do BCF (EDS1, EDS2, EDS3, EDS4, EDS5 e EDS6, respetivamente).

4.4.3 Condutividade, pH e temperatura

Os parâmetros de condutividade, pH e temperatura da água foram medidos diariamente ao longo do experimento.

O pH e a temperatura das amostras BSF1, BSF2, AAF1, AAF2, BCF1 e BCF2 foram medidos com o pHmetro modelo K39-0014PA da marca KASVI imediatamente após da coleta das amostras. A condutividade elétrica foi medida no condutivímetro modelo K53-001 da marca KASVI (Ver Figura 4.21).

Figura 4.21. Equipamentos: a) pHmetro KASVI K39-0014PA, b) condutivímetro KASVI K53-001.



Fonte: própria do autor.

Os eletrodos do condutivímetro e pHmetro foram calibrados semanalmente com a solução padrão de condutividade de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e de pH 4, 7 e 10, respectivamente.

4.4.4 Carbono orgânico total

As análises de Carbono Orgânico Total (COT) foram realizadas no TOC-L CPH da marca SHIMADZU, seguindo a metodologia analítica 5310 B - Método de Combustão de Alta Temperatura (Ver Figura 4.22).

Figura 4.22. Equipamento TOC-L CPH SHIMADZU para a medição de COT.



Fonte: própria do autor.

Inicialmente, as formas de carbono eram oxidadas a dióxido de carbono através de combustão catalítica a temperatura de 680°C. Assim, tinha-se o valor do carbono total (CT). O carbono inorgânico era medido através da conversão do carbonado e bicarbonato em dióxido de carbono, realizado com o processo de acidificação da amostra utilizando ácido clorídrico a 1 mol/L. A concentração de carbono orgânico total era calculada com a Equação 4.3.

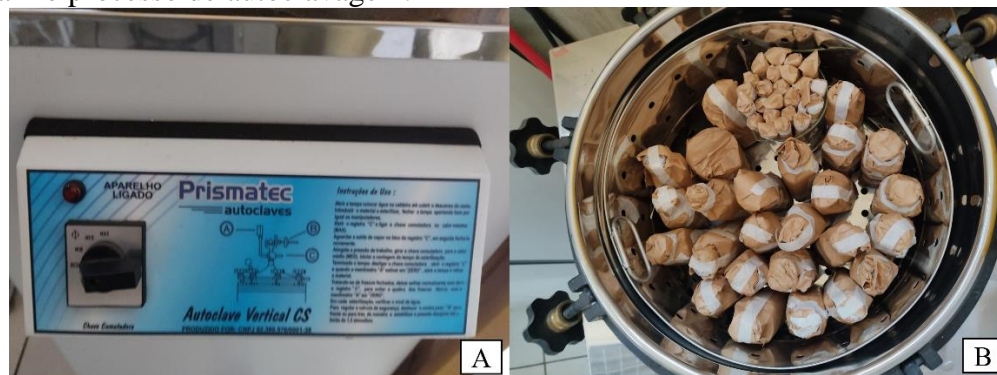
$$COT = CT - CIT \quad (4.3)$$

Onde: CT: Carbono Total (mg/L); CIT: Carbono Inorgânico Total (mg/L); COT: Carbono Orgânico Total (mg/L)

4.4.5 *Escherichia coli* e coliformes totais

A quantificação de microrganismos presentes nas amostras foi feita através de análises de coliformes totais e *Escherichia coli*. Toda a vidraria e ponteiras utilizadas nos testes eram previamente autoclavadas na Autoclave Vertical CS da marca Primatec autoclaves (Ver Figura 4.23), a pressão constante de 1,5 bar durante 60 min.

Figura 4.23. Equipamento usado na autoclave do material, a) autoclave marca Primatec, b) material no processo de autoclavagem.



Fonte: própria do autor.

Para a análise de coliformes totais, era adicionado o reagente em 100 ml de amostra, seguindo-se a sua colocação na cartela do sistema Quanti-Tray/2000. A cartela era vedada na seladora Quanti-Tray e colocada em estufa da marca Brasimet modelo Professional 50 a $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ durante 24 h (Ver Figura 4.24). Depois do tempo de incubação, era feita a leitura do número dos poços amarelos, que indicavam a presença de coliformes totais. Mediante a utilização do Software IDEXX Water MPN Generator, era calculado o número mais provável (NMP) de microrganismos em cada 100 mL de amostra.

Figura 4.24. Materiais usados em análises a) *E. coli* e coliformes totais, b) estufa Brasimet Professional 50.



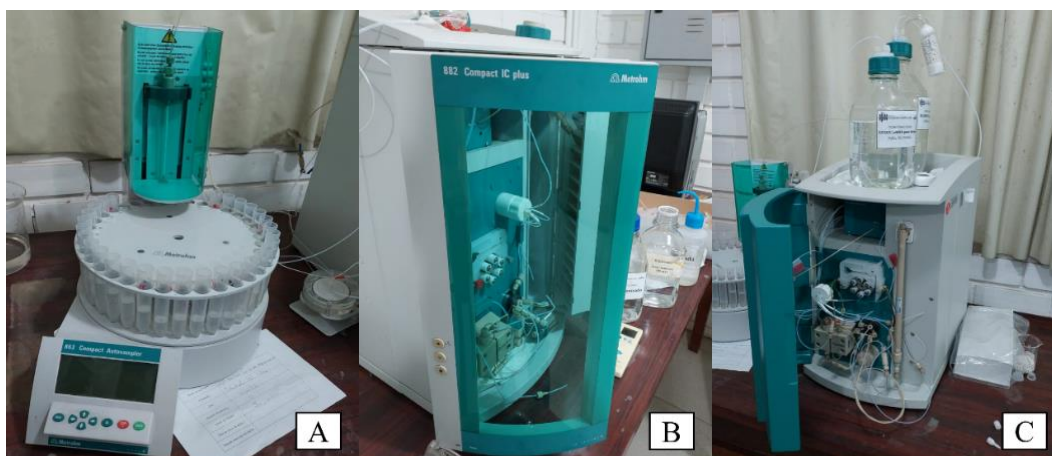
Fonte: própria do autor.

Para a análise de *E. coli* era usada uma lâmpada de fluorescência de luz UV com comprimento de onda de 365 nm. Na presença de *E. coli* a coloração dos poços das cartelas, muda de amarelo para amarelo fluorescente. Com a contagem dos poços amarelos fluorescentes e os amarelos calculava-se a concentração de *E. coli*, com o Software IDEXX Water MPN Generator.

4.4.6 Fluoreto

A concentração do íon fluoreto presente na água era feita diariamente, com o cromatógrafo iônico modelo Eco IC com amostrados automático compacto 863 da METROHM (Figura 4.25). Utilizou-se a coluna analítica para ânions Metrosep A supp5[®]. As concentrações dos íons fluoretos eram dados na unidade mg F/L.

Figura 4.25. Cromatógrafo iônico Eco IC usado para medição do íon fluoreto.



Fonte: própria do autor.

4.4.7 Turbidez

A determinação da turbidez seguiu a metodologia analítica 2130 B – Método Nefelométrico (APHA; AWWA; WEF, 2017), utilizando um turbidímetro da marca HACH modelo 2100N. O equipamento era previamente calibrado com os padrões de turbidez de 0,2; 2 e 20 unidades nefelométricas de turbidez UNT (Ver Figura 4.26).

Figura 4.26. Equipamento para medição de turbidez, Turbidímetro HACH - 2100N, modelo 2100N.



Fonte: própria do autor.

As amostras eram inseridas em um tubo de vidro próprio do equipamento. Este era lavado com água deionizada e ambientado com a amostra a ser analisada. A leitura de cada amostra era feita em triplicata para garantir uma medida representativa.

4.5 TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados resultantes da fase experimental do experimento foram analisados com estatística descritiva e testes de hipóteses para verificar diferenças significativas entre os resultados. Foi utilizado o Software Microsoft Excel versão 2203 compilação 16.0.15028.20152.

Os dados obtidos como resultados da fase experimental foram avaliados para verificar se as diferenças entre os dados iniciais e finais dos parâmetros físicos, químicos e biológicos foram significativos, em termos de redução percentual de microrganismos, turbidez e flúor na água. Estes resultados foram analisados a partir do cálculo das estatísticas (média aritmética, média geométrica, mediana, moda, desvio padrão, valores mínimos, máximos e discrepantes, variância, distância interquartil, amplitude e assimetria) de forma descritiva no software Microsoft Excel. A representação gráfica dos resultados obtidos a partir das análises estatísticas de cada um dos parâmetros avaliados foi realizada por gráficos de caixas (box plots) e gráficos de eficiência de remoção em função do tempo do experimento.

As eficiências de remoção dos parâmetros avaliados no BSF, AAF e BCF, foram analisadas individualmente. O objetivo foi apresentar resultados analíticos a partir das características de desenho de cada um dos filtros, mediante o auxílio do programa Microsoft Excel, aplicando o teste ANOVA como análises de variância com nível de significância de 0,05, uma vez foi comprovado que os dados foram paramétricos (Ver anexo 9.3).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos e respectivas discussões. Inicia-se com a apresentação do sistema completo instalado e a aplicação da metodologia na preparação da água bruta, explicando cada uma das fases. Por fim, é discutido o desempenho do sistema completo considerando os resultados das análises físicas, químicas e biológicas, MEV e EDS.

5.1 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO COMPLETO

A Figura 5.1 apresenta o sistema de tratamento completo, montado em triplicata. No primeiro mês de operação, um dos sistemas apresentou infiltrações que não puderam ser corrigidas e decidiu-se por continuar o experimento em duplicata. O processo de instalação do sistema durou aproximadamente 4 meses, desde a aquisição dos materiais até o sistema estar pronto para início da operação.

Figura 5.1. Sistema de tratamento completo instalado, a) vista geral, b) vista lateral c) vista superior do sistema.



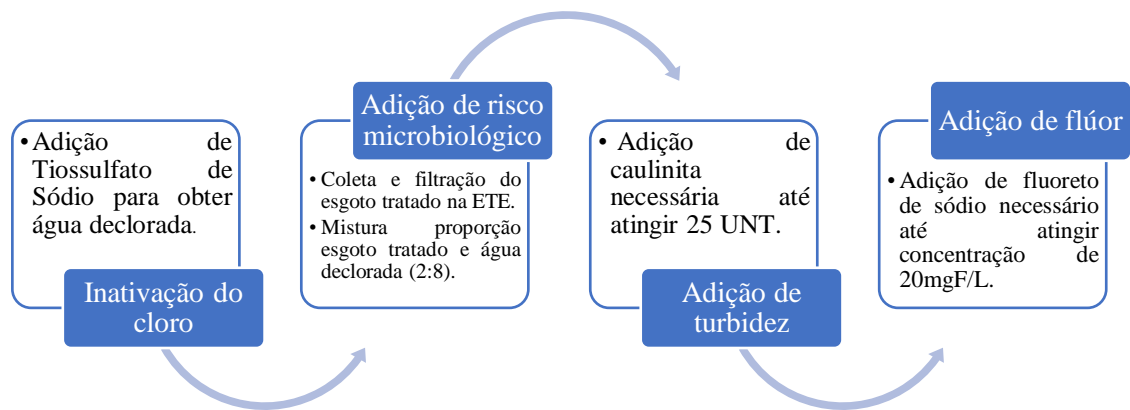
Fonte: própria do autor.

5.2 PREPARAÇÃO DA ÁGUA DO ESTUDO

A preparação da água bruta, garantiu as características necessárias em termos de presença de risco microbiológico, concentração de flúor de 20 mg F/L e turbidez de 25 UNT, valores que excedem os padrões de potabilidade da água para consumo humano estabelecidos

pela Portaria n° 888/2021 (BRASIL, 2021). Conforme descrito na seção de metodologia, semanalmente eram preparados 100 L de água bruta. A Figura 5.2 apresenta o resumo das etapas para a preparação da água bruta e posterior alimentação do sistema com aproximadamente 12 L diariamente.

Figura 5.2. Sequência das etapas para preparação da água bruta.



Fonte: própria do autor.

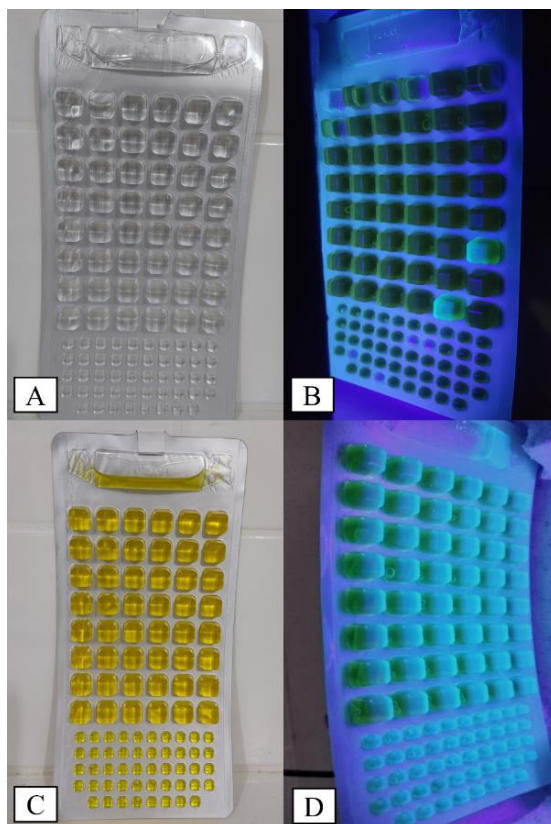
5.2.1 Inativação do cloro

Eram necessários 0,5 ml de titulante Sulfato Ferroso Amoniacal Hexahidratado (FAS) para mudar de cor rosa para incolor. Depois disso, eram necessários 0,02 ml de Tiosulfato de Sódio para inativar o cloro presente em 100 ml de água da torneira.

5.2.2 Adição de coliformes totais e *Escherichia coli*

A mistura da água dechlorada com o esgoto tratado do decantador secundário da estação de tratamento possibilitou a presença de coliformes totais e *E. coli* na água bruta que alimentava o sistema de tratamento, com concentração média de 3945 NMP/100 mL e 8475 NMP/100 mL, respectivamente. A amostra da água da torneira dechlorada, antes da mistura com o esgoto tratado, não apresentava presença de coliformes totais e *E. coli*. (Ver Figura 5.3).

Figura 5.3. Teste Quanti-Tray, a) resultado amostra branco sem presença de coliformes totais, b) resultado amostra branco sem presença de *E. coli*, c) amostra de água bruta para coliformes totais com concentração de 8475 NMP/100 mL, d) amostra de água bruta com concentração de *E. coli* de 3945 NMP/100 mL.



Fonte: própria do autor.

5.2.3 Adição de turbidez

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados obtidos para determinar a relação de massa de caulinita por volume de água necessários para atingir 25 UNT. Foram realizados ensaios com massas desde 0,01 g até 0,1 g de caulinita em 1 L de água. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

Tabela 5.1. Valores de turbidez em função da massa de caulinita adicionada.

Massa de caulinita (g)	Valor de Turbidez (UNT)			Turbidez Média (UNT)	Desvio Padrão
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3		
0	0,35	0,34	0,35	0,35	0,006
0,01	6,29	6,35	6,15	6,26	0,103
0,02	15,1	14,6	14,9	14,87	0,252
0,03	18,7	18,6	18,2	18,50	0,265
0,04	20,6	20,8	20,5	20,63	0,153
0,05	25,4	25,1	25,3	25,27	0,153
0,06	42,6	42,9	43,1	42,87	0,252
0,07	43,9	44,5	43,8	44,07	0,379
0,08	44,3	45,2	44,5	44,67	0,473
0,09	51,5	50,8	51,3	51,20	0,361
0,1	62,3	63,1	62,4	62,60	0,436

Fonte: própria do autor.

5.2.4 Adição de flúor

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados obtidos para determinar a relação de massa de fluoreto de sódio por volume de água necessários para atingir 20 mg F/L, como concentração desejada, considerando a concentração de fluoreto já presente na água da torneira. Foram realizados ensaios com massas desde 0,02 g NaF/L até 0,1 g NaF/L. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

Tabela 5.2. Resultados de ensaios para determinação de massa de fluoreto de sódio.

Concentração de NaF (g/L)	Valor de Fluoreto (mg F/L)			Fluoreto Média (mg F/L)	Desvio Padrão
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3		
0	0,102	0,117	0,117	0,11	0,009
0,02	10,266	9,748	9,743	9,92	0,301
0,04	19,698	20,122	20,213	20,01	0,275
0,06	29,744	30,087	30,185	30,01	0,232
0,08	40,31	40,785	40,49	40,53	0,240
0,1	49,698	50,292	50,202	50,06	0,320

Fonte: própria do autor.

5.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO EM RELAÇÃO A REMOÇÃO DOS CONTAMINANTES

Foi realizado o monitoramento com análises físicas, químicas e microbiológicas do BSF, AAF e BCF ao longo do período de operação do experimento. Os resultados foram analisados por meio do cálculo das estatísticas básicas de cada um dos filtros do projeto (BSF, AAF, BSF), comparando os valores obtidos na análise da água bruta. As eficiências de remoção dos parâmetros foram avaliadas quanto ao seu atendimento aos padrões de potabilidade. Por último, são apresentadas as imagens comparativas dos biofilmes desenvolvidos nos grãos de areia, alumina ativada e carvão de osso, avaliando o crescimento a partir do início até o fim do experimento.

5.3.1 Análises físicas, químicas e microbiológicas

Todos os parâmetros físicos, químicos e biológicos avaliados foram medidos em duplicata. Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados de cada um dos parâmetros analisados. Os dados obtidos e os padrões de potabilidade estabelecidos para cada parâmetro também são apresentados na forma de gráficos de caixas e series temporais, que podem ser observados a partir da Figura 5.4 até a Figura 5.31.

Tabela 5.3. Resultados da aplicação da estatística descritiva aos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos de monitoramento.

(Continua)

Parâmetro	Água Bruta	Filtro biosand (BSF)	Filtro Alumina Ativada	Filtro Carvão de Osso
			(AAF)	(BCF)
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)				
Media Aritmética	8,2	7,8	27,5	50,9
Media Geométrica	8,2	7,8	27,5	50,2
Mediana	8,2	7,9	27,9	50,0
Moda	7,9	7,9	28,8	7,9
Desvio Padrão	0,4	0,4	1,2	2,2
Valor Mínimo	7,6	7	25,2	46,6
Valor Máximo	8,9	8,5	29,3	53,7
n	13	13	13	13

Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)				
Media Aritmética	288	282	757	1 009
Media Geométrica	289	284	767	1 184
Mediana	298	297	730	975
Moda	314	307	716	688
Desvio Padrão	27	33	166	1 158
Valor Mínimo	223	207	582	484
Valor Máximo	335	355	1 348	4 301
n	89	89	89	89
pH				
Media Aritmética	7,4	7,4	11,1	10,9
Media Geométrica	7,4	7,4	11,1	10,9
Mediana	7,5	7,6	11,5	11,1
Moda	7,6	7,9	11,5	10,8
Desvio Padrão	0,4	0,5	0,9	0,6
Valor Mínimo	6,4	6,4	8,4	9,2
Valor Máximo	8,1	8,4	12,2	11,5
n	89	89	89	89
Temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$)				
Media Aritmética	18,5	18,5	18,5	18,5
Media Geométrica	18,6	18,6	18,6	18,5
Mediana	18,9	18,9	18,9	18,8
Moda	18,1	18,2	18,3	19,2
Desvio Padrão	1,6	1,7	1,7	1,7
Valor Mínimo	15,4	15	14,9	14,7
Valor Máximo	22,2	22,3	22,2	22,3
n	89	89	89	89
Carbono Orgânico Total (mg COT/L)				
Media Aritmética	2,1	1,5	3,6	11,2
Media Geométrica	2,1	1,5	3,8	12,9
Mediana	2,1	1,5	4,3	12,6
Moda	1,9	1,9	2,4	14,6
Desvio Padrão	0,3	0,4	1,3	10,8
Valor Mínimo	1,7	0,9	2,4	4,9

Valor Máximo	2,6	2,2	5,8	43,5
n	10	10	10	10
<i>Escherichia Coli</i> (NMP/100 mL)				
Media Aritmética	2 862	76	0	0
Media Geométrica	2 982	100	0	0
Mediana	3 313	132	0	0
Moda	3 455	143	0	0
Desvio Padrão	737	46	0	0
Valor Mínimo	1 613	20	0	0
Valor Máximo	3 945	175	0	0
n	18	18	18	18
Coliformes Totais (NMP/100 mL)				
Media Aritmética	4 212	13	5	5
Media Geométrica	4 358	57	5	5
Mediana	4 196	163	5	5
Moda	4 196	5	5	5
Desvio Padrão	1 352	159	0	0
Valor Mínimo	2 558	5	5	5
Valor Máximo	8 475	569	5	5
n	18	18	18	18
Fluoreto (mg F/L)				
Media Aritmética	21,1	16,8	4,9	0,8
Media Geométrica	21,3	17,5	5,5	0,9
Mediana	20,8	19,2	6,8	1,0
Moda	18,8	11,1	5,8	0,5
Desvio Padrão	2,9	4,6	2,0	0,3
Valor Mínimo	15,6	9,8	1,2	0,4
Valor Máximo	33,3	26,7	8,5	1,5
n	89	89	89	89
Turbidez (UNT)				
Media Aritmética	24,9	0,9	0,9	1,3
Media Geométrica	25,0	0,9	0,9	2,2
Mediana	24,8	0,9	0,9	1,7
Moda	24,3	1,0	0,8	0,8

Desvio Padrão	1,2	0,2	0,2	3,3
Valor Mínimo	22,5	0,4	0,5	0,4
Valor Máximo	28,7	1,3	1,5	10,7
n	89	89	89	89

Fonte: própria do autor.

Depois de obter os dados de cada um dos parâmetros analisados, foi aplicado o teste ANOVA como a análise paramétrica de variância e testou-se a hipótese que as médias são iguais, entre os (BSF1 e BSF2), (AAF1 e AAF2), (BCF1 e BCF2) e (AAF e BCF). Foi feita a análise de um fator de variabilidade com nível de significância de 0,05. Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados de cada um dos parâmetros analisados com o teste ANOVA.

Tabela 5.4. Resultados da aplicação do teste ANOVA aos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos de monitoramento.

(continua)

Alcalinidade (mg CaCO₃/L)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	7,75	0,10	0,14	0,713	3,92
BSF2	7,93	0,37			
AAF1	27,22	3,95	0,75	0,395	4,26
AAF2	27,75	0,93			
BCF1	51,52	14,65	5,13	0,033	4,26
BCF2	48,85	3,31			
AAF	27,49	1,49	1027,56	3,25E-21	4,26
BCF	50,87	5,03			
Condutividade (µS/cm)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	284,92	874,15	0,08	0,78	3,92
BSF2	286,67	1607,13			
AAF1	690,11	6758,19	30,40	1,86E-07	3,92
AAF2	842,57	42946,72			
BCF1	1432,58	1352181,97	0,18	0,67	3,92
BCF2	1517,85	1289219,91			
AAF	756,54	27436,06	23,42	3,68E-06	3,92
BCF	1009,32	1341422,25			
pH					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	7,38	0,35	0,37	0,54	3,92
BSF2	7,44	0,25			
AAF1	11,14	1,01	0,18	0,67	3,92
AAF2	11,07	0,67			
BCF1	10,94	0,44	0,45	0,50	3,92

BCF2	10,86	0,40			
AAF	11,11	0,73	2,45	0,12	3,92
BCF	10,90	0,41			
Temperatura da água (°C)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	18,62	2,88	0,01	0,94	3,92
BSF2	18,65	2,92			
AAF1	18,62	3,08	0,01	0,92	3,92
AAF2	18,66	2,96			
BCF1	18,62	2,97	2,12E-03	0,96	3,92
BCF2	18,63	2,91			
AAF	18,59	3,02	1,67E-03	0,97	3,92
BCF	18,52	2,94			
Carbono Orgânico Total (mg COT/L)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	1,51	0,37	0,34	0,57	4,41
BSF2	1,63	0,09			
AAF1	4,19	2,39	0,31	0,59	4,41
AAF2	3,80	2,69			
BCF1	12,99	57,40	0,03	0,87	4,41
BCF2	13,48	25,32			
AAF	3,60	1,62	25,68	8,03E-05	4,41
BCF	11,20	31,35			
Escherichia Coli (NMP/100 mL)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	50,83	4033,44	0,26	0,61	4,13
BSF2	62,72	5733,62	0,26		
AAF1	0,00	0,00	65535,00	0,00	4,13
AAF2	0,00	0,00	65535,00		
BCF1	0,00	0,00	65535,00	0,00	4,13
BCF2	0,00	0,00	65535,00		
AAF	0,00	0,00	65535,00	0,00	4,13
BCF	0,00	0,00	65535,00		
Coliformes Totais (NMP/100 mL)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	119,61	27392,72	0,02	0,90	4,13
BSF2	126,78	25488,89			
AAF1	1,11	10,46	2,13	0,15	4,13
AAF2	1,10	9,99			
BCF1	1,11	10,46	2,12	0,15	4,13
BCF2	0,99	10,29			
AAF	5,00	2,61	1,09E-14	1,00	4,13
BCF	5,00	2,61			

Fluoreto (mg F/L)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	16,98	15,01	0,14	0,71	3,92
BSF2	17,25	18,95			
AAF1	6,14	4,41	0,29	0,59	3,92
AAF2	5,95	3,94			
BCF1	0,73	0,24	0,06	0,81	3,92
BCF2	0,75	0,23			
AAF	4,85	3,97	438,35	3,68E-43	3,92
BCF	0,84	0,22			
Turbidez (UNT)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	0,88	0,04	0,55	0,46	3,92
BSF2	0,91	0,06			
AAF1	0,90	0,06	1,13	0,29	3,92
AAF2	0,95	0,06			
BCF1	3,48	8,93	0,68	0,41	3,92
BCF2	3,96	13,37			
AAF	0,90	0,03	47,71	2,07E-10	3,92
BCF	1,33	10,64			

Fonte: própria do autor.

5.4 DISCUSSÃO

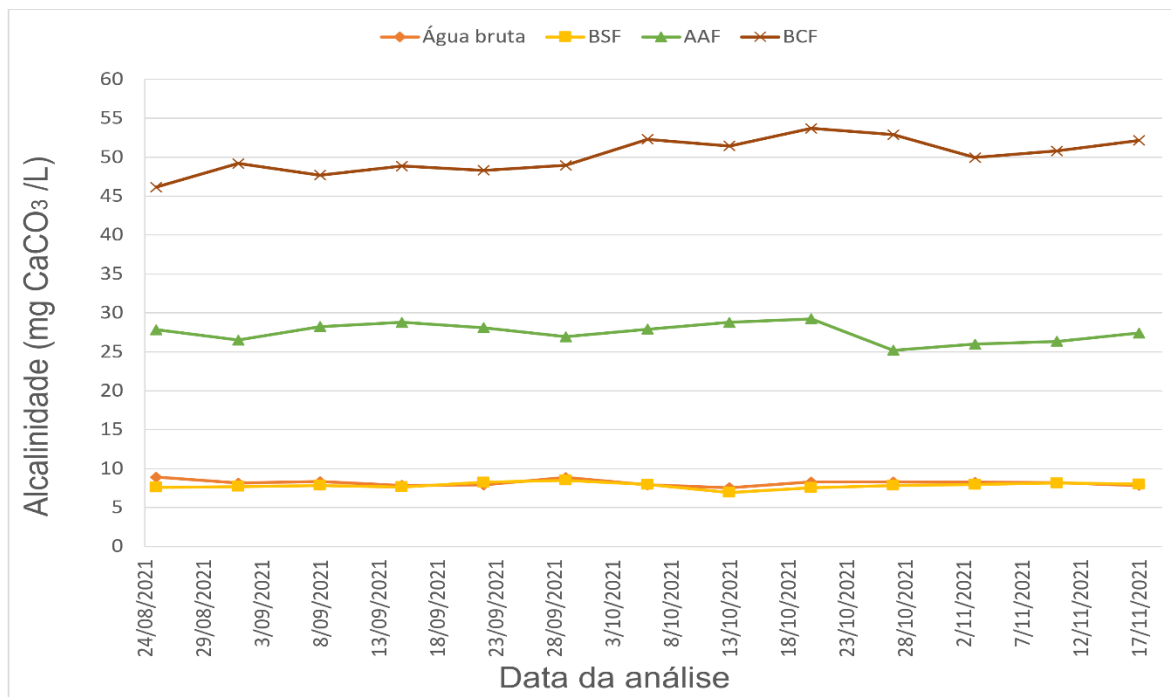
A discussão dos resultados é apresentada de forma individual para cada um dos parâmetros monitorados.

5.4.1 Alcalinidade

As concentrações de alcalinidade ao longo do tempo do experimento são apresentadas na Figura 5.4. Não houve mudanças significativas no decorrer do período avaliado, correspondendo assim a uma dinâmica constante em cada um dos filtros.

Especificamente com o teste ANOVA, a probabilidade de 0,03 do BCF em duplicata (BCF1 e BCF2), e a probabilidade de 3,25E-21 das médias do AAF e BCF, foram menores que o nível de significância de 0,05. Por tanto, a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que não todas as médias são iguais.

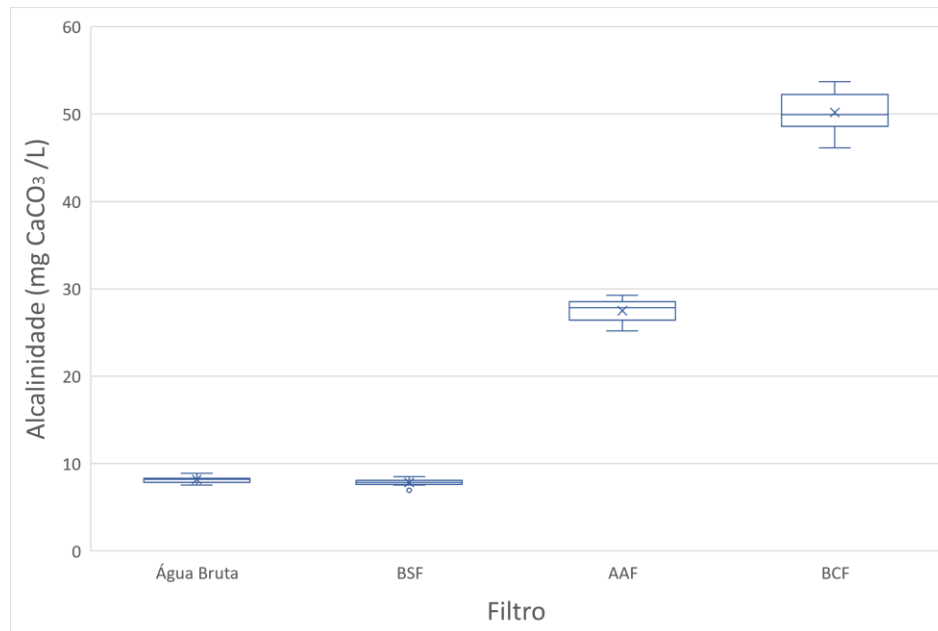
Figura 5.4. Concentrações de alcalinidade na água bruta e nos efluentes do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) ao longo do tempo de operação do sistema.



Fonte: própria do autor.

A amplitude nos valores da água bruta e do BSF foram baixas em comparação aquelas observadas nos filtros AAF e BCF. A média e a mediana foram praticamente idênticas. As alcalinidades no efluente do filtro de alumina ativada e carvão de osso foram, respectivamente, 3,5 e 6,5 vezes a concentração da água bruta e filtro biosand. Isto se refletiu no aumento de pH. A Figura 5.5 apresenta o gráfico de caixa para as concentrações de alcalinidade.

Figura 5.5. Gráfico de caixa para as concentrações de alcalinidade na água bruta e filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



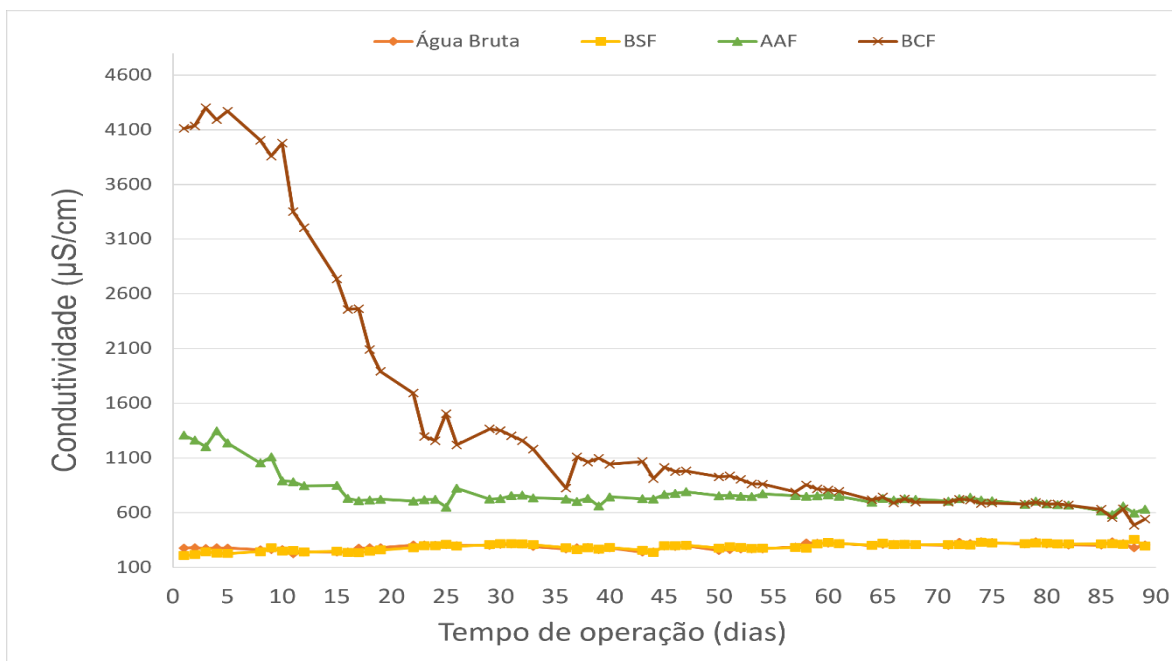
Fonte: própria do autor.

5.4.2 Condutividade

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam, respectivamente, os valores de condutividade elétrica medidas em relação ao tempo e o gráfico de caixa. Elas evidenciam comportamentos diferentes em cada um dos filtros devido as características dos materiais adsorventes implementados. O BCF apresentou diminuição dos valores de condutividade elétrica ao longo da operação, iniciando acima de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e finalizando próximo a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

O efluente do filtro de AAF também apresentou valores decrescentes nos primeiros 15 dias, que depois se estabilizaram até serem aproximadamente iguais ao efluente do BCF. Os valores de condutividade elétrica apresentados na água bruta e no BSF apresentaram um comportamento estável ao longo do experimento, com valores menores que os filtros BCF e AAF.

Figura 5.6. Concentrações de condutividade elétrica na água bruta e nos efluentes do BSF, AAF e BCF em função do tempo de operação do sistema.

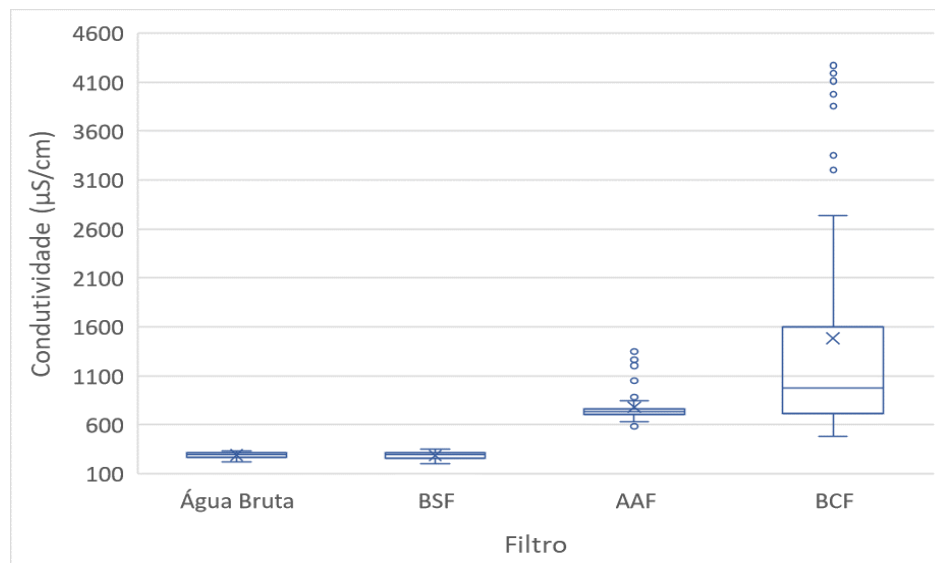


Fonte: própria do autor.

Na figura 5.7, pode se observar que os valores de condutividade elétrica para a água bruta e BSF, apresentaram amplitudes baixas enquanto o efluente do filtro AAF e BCF tiveram amplitude mais alta, atribuída aos valores mais altos dos primeiros 15 dias de operação, devido a remoção dos possíveis poluentes dos materiais adsorventes, alumina ativada e carvão de osso.

Especificamente com o teste ANOVA, a probabilidade de $1,86E-07$ do AAF em duplicata (AAF1 e AF2), e a probabilidade de $3,68E-06$ das médias do AAF e BCF, foram menores que o nível de significância de 0,05. Por tanto, a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que não todas as médias são iguais.

Figura 5.7. Gráfico de caixa para os valores de condutividade elétrica na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



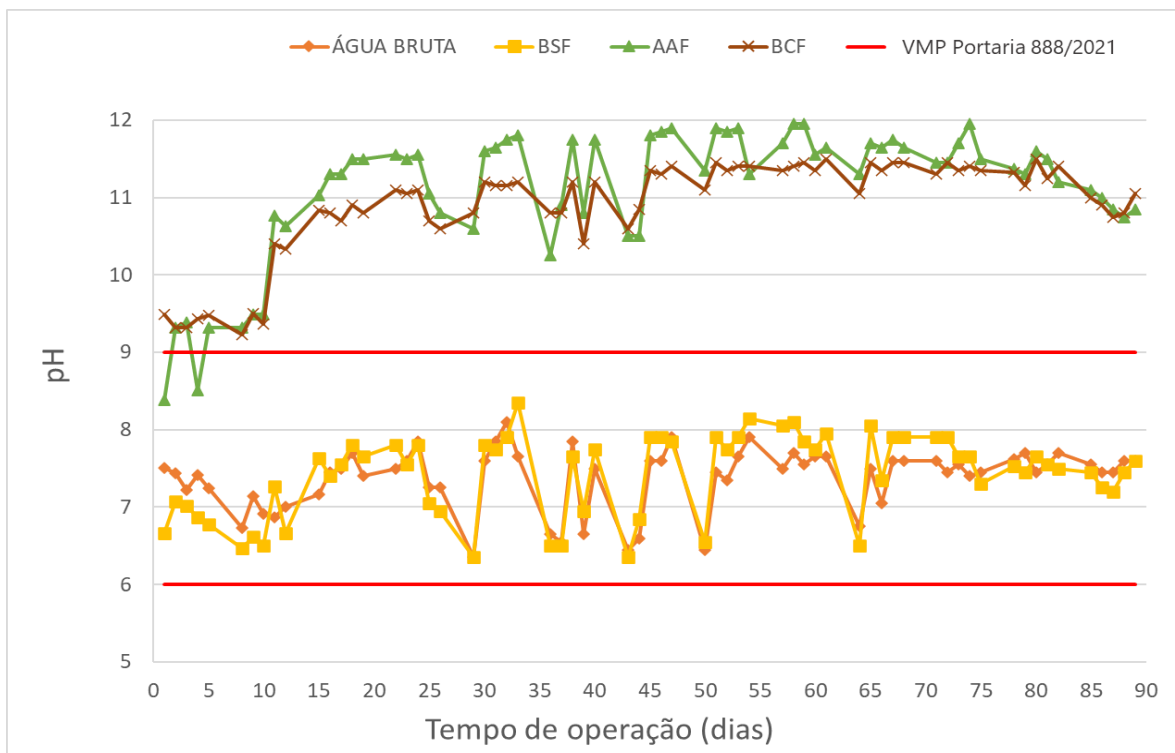
Fonte: própria do autor.

5.4.3 pH

A Figura 5.8 apresenta os valores de pH medidos ao longo do experimento para água bruta e o efluente do filtro BSF, AAF e BCF. Observa-se que há um acréscimo significativo do pH nos filtros de alumina ativada e carvão de osso, com pH entre 10 e 12. Uma possível explicação seria a liberação para o líquido de íons hidroxilas presentes nas superfícies dos materiais (SHINZATO et al., 2018). Os valores elevados de pH nos efluentes de AAF e BCF excedem ao valor máximo permitido pela portaria de potabilidade da água no Brasil, que é 9,0. Os valores de pH na água bruta e efluente do filtro BSF foram muito próximos, entre 6,5 e 8,0.

Especificamente com o teste ANOVA, a probabilidade de todas os grupos analisados, BSF, AAF e BCF, os três em duplicata e as médias do AAF e BCF foram maiores que o nível de significância de 0,05. Por tanto, a hipótese nula é comprovada e conclui-se que as médias dos grupos são iguais.

Figura 5.8. Valores de pH medidos na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.

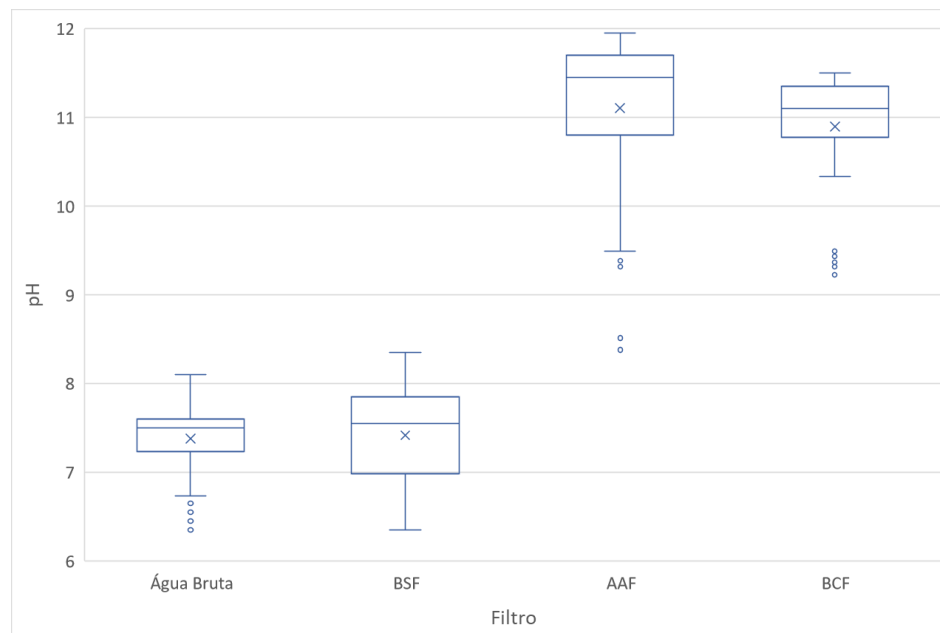


Fonte: própria do autor.

No BSF, o pH não teve alterações consideráveis em comparação com a água bruta, ou seja, o filtro biosand não interferiu no pH da água. O comportamento foi semelhante entre eles em função do tempo de operação, com valores de desvio padrão de 0,4 e 0,5 para a água bruta e o BSF respectivamente. Os valores de pH no efluente do filtro biosand estão na faixa permitida para água portátil no Brasil, entre 6 e 9.

A Figura 5.9 apresenta o gráfico de caixa para os valores de pH. Os efluentes dos três filtros, assim como água bruta apresentaram assimetrias negativas. Não há diferença significativa na média e mediana da água bruta e do BSF. Os valores máximos da média e mediana ocorreram no efluente do filtro AAF.

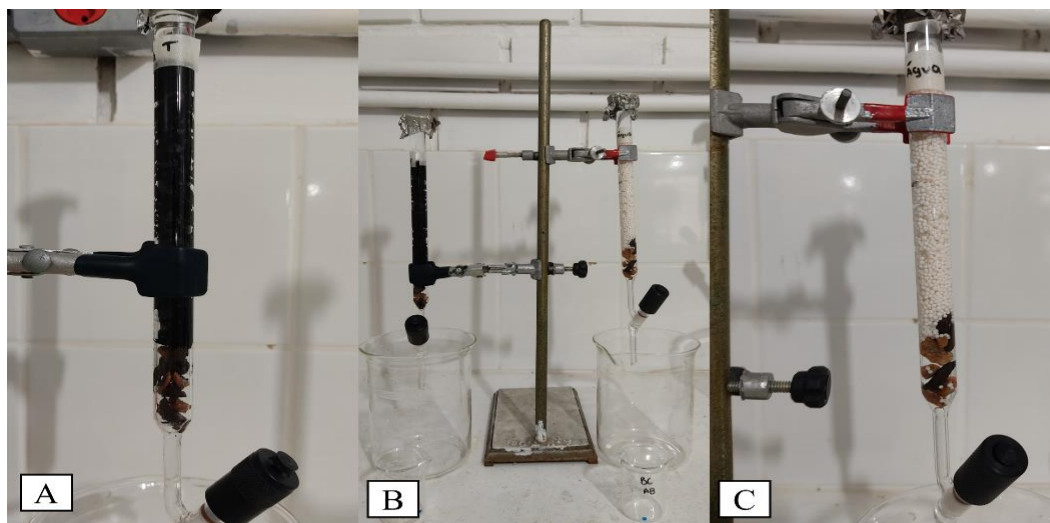
Figura 5.9. Gráfico de caixa para os valores de pH na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



Fonte: própria do autor.

Como mencionado, os pH do filtro AAF e BCF ultrapassam os valores máximos permitidos para água potável. Para ajudar na compreensão deste aumento inesperado de pH, foi feita uma análise adicional, com experimento externo ao sistema de tratamento. Este experimento teve o intuito de atribuir o aumento do pH as características químicas dos materiais adsorventes e não a água em si (Figura 5.10). Foram analisados três tipos de água, em separado: água da torneira, o efluente do BSF e água fluoretada com as mesmas características de concentração do experimento (20 mg F/L). Como pode ser observado nas Figuras 5.11 a 5.13, os pH finais do AAF e BCF apresentaram aumentos significativos comparados com os valores de pH iniciais, nas três amostras nos 8 dias que foi desenvolvido a análise.

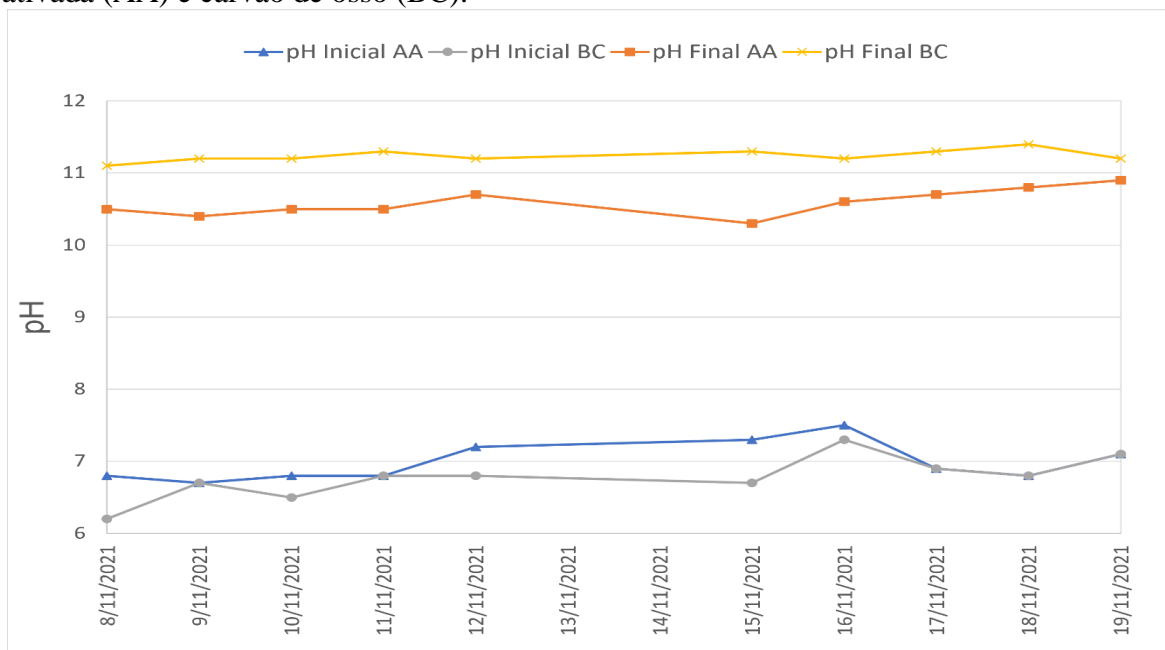
Figura 5.10 Ensaio de pH, a) coluna de carvão de osso, b) montagem completo para água da torneira, c) coluna com alumina ativada.



Fonte: própria do autor.

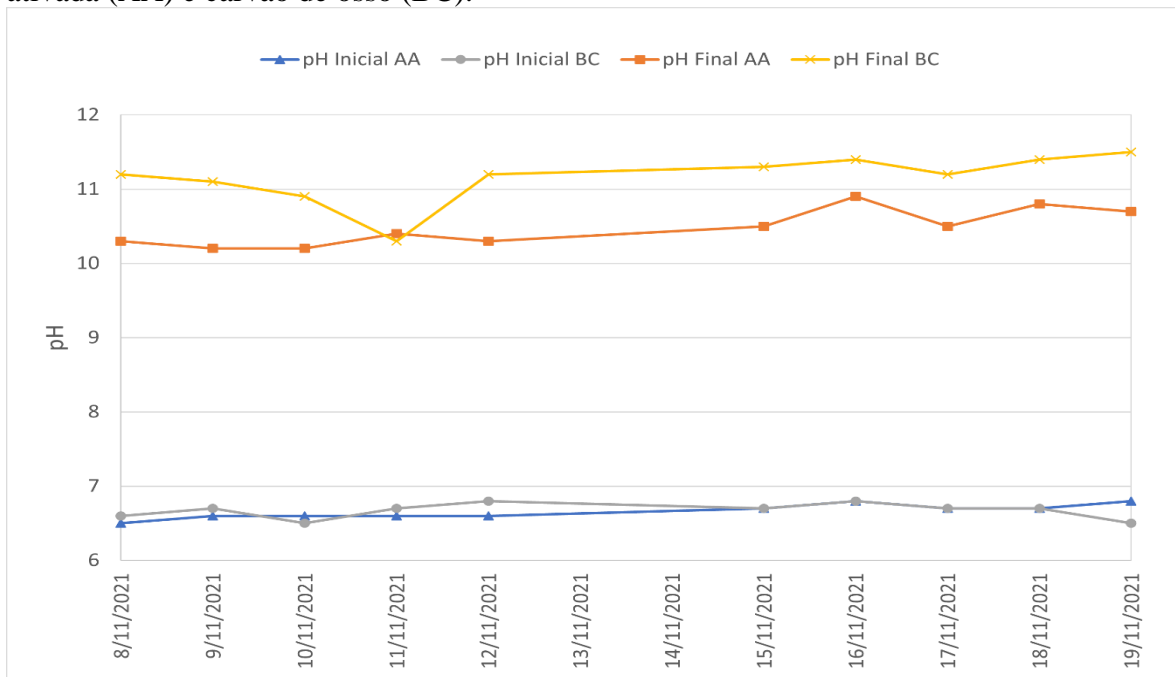
Os fabricantes da alumina ativada (ÁguaPro Purificação de Águas) e do carvão de osso (Bonechar - Carvão Ativado do Brasil LTDA), indicaram não ter conhecimento sobre este comportamento de aumento considerável do valor de pH na água tratada.

Figura 5.11. Ensaio de pH com água da torneira nos materiais adsorventes de alumina ativada (AA) e carvão de osso (BC).



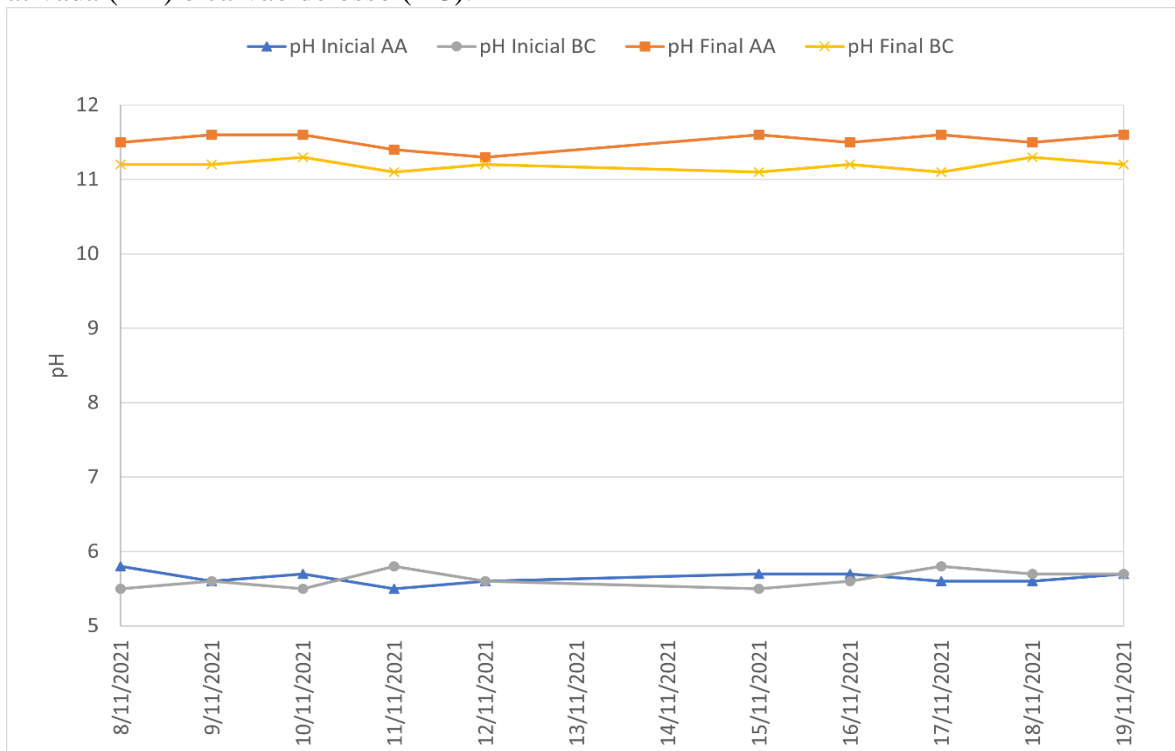
Fonte: própria do autor.

Figura 5.12. Ensaio de pH com efluente do BSF nos materiais adsorventes de alumina ativada (AA) e carvão de osso (BC).



Fonte: própria do autor.

Figura 5.13. Ensaio de pH com água fluoretada nos materiais adsorventes de alumina ativada (AA) e carvão de osso (BC).

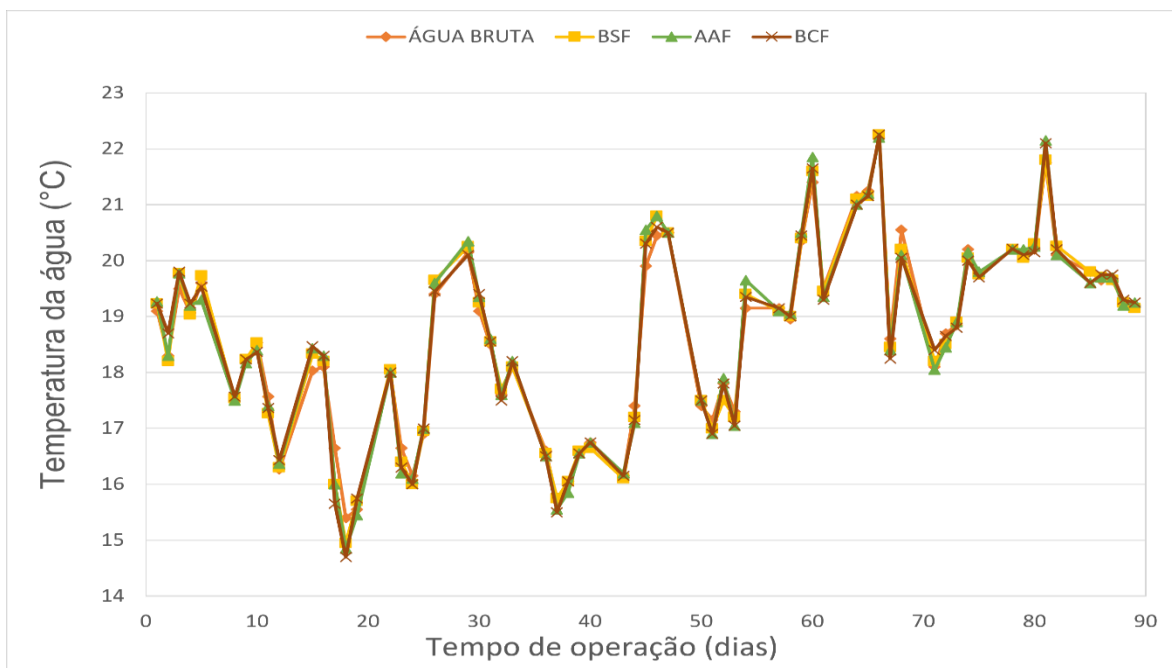


Fonte: própria do autor.

5.4.4 Temperatura da água

Os valores de temperatura da água, medidos diariamente, tanto na água bruta como nos três tipos de filtro, apresentaram condições próximas entre si, tanto na série temporal da operação do experimento (Figura 5.14) quanto na análise das estatísticas descritivas (Figura 5.15). Os valores das médias e medianas foram semelhantes e os desvios padrões foram baixos, na faixa de 1,6 a 1,7 °C.

Figura 5.14. Valores de temperatura da água na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.

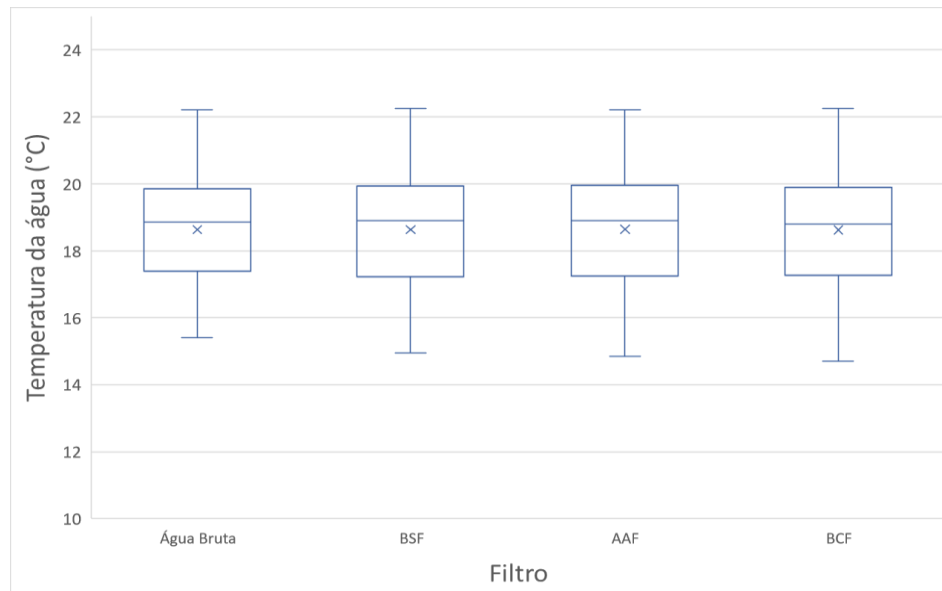


Fonte: própria do autor.

Importante ressaltar que os valores baixos na medição da temperatura, correspondem a dias frios. Além disso, a medição da temperatura foi sempre no mesmo horário e uma vez por dia.

Especificamente com o teste ANOVA, a probabilidade de todas os grupos analisados, BSF, AAF e BCF, os três em duplicata e as médias do AAF e BCF foram maiores que o nível de significância de 0,05. Por tanto, a hipótese nula é comprovada e conclui-se que as médias dos grupos são iguais.

Figura 5.15. Gráfico de caixa para os valores de temperatura na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



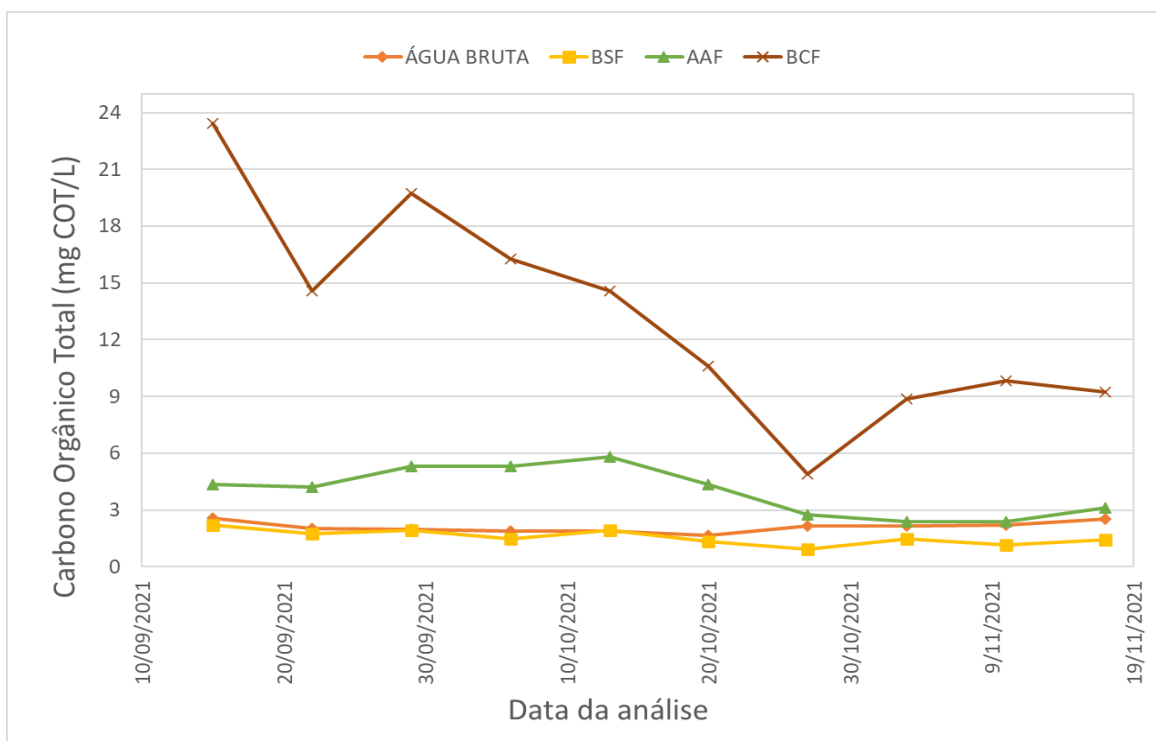
Fonte: própria do autor.

5.4.5 Carbono orgânico total

A Figura 5.16 apresenta as concentrações de carbono orgânico total (COT) na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF). Observa-se que as concentrações de COT no efluente do BCF são maiores do que nas dos outros. Isto era um resultado esperado, devido as propriedades químicas do material adsorvente utilizado neste filtro referente à presença de carbono. Segundo informado pela empresa fornecedora do carvão ativado de osso bovino utilizado no experimento, este material apresenta cerca de 12% de carbono. De acordo com o fabricante (Bonechar Carvão Ativado do Brasil), o principal constituinte inorgânico dos ossos bovinos é a hidroxiapatita, que representa cerca de 70-75% da composição total.

Especificamente com o teste ANOVA, a probabilidade de 8,03E-05 das médias do AAF e BCF, foram menores que o nível de significância de 0,05. Por tanto, a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que não todas as médias são iguais.

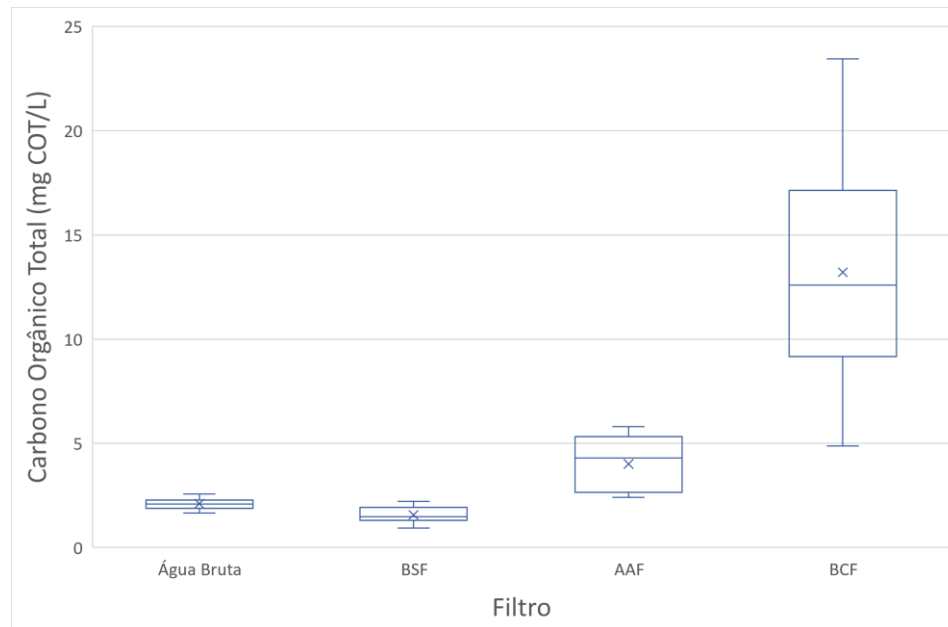
Figura 5.16. Valores de COT na água bruta e nos efluentes do BSF, AAF e BCF em função do tempo de operação do sistema.



Fonte: própria do autor.

As concentrações de COT, analisadas semanalmente, apresentaram amplitudes baixas para água bruta e efluente do BSF, aumentando para o efluente do filtro AAF e BCF (Figura 5.17). A média e mediana na água bruta e no BSF apresentaram valores idênticos, 2,1 mg/L e 1,5 mg/L, enquanto o filtro BCF apresenta a maior parte dos dados abaixo da média. O AAF apresenta dados com assimetria negativa, os dados estão distantes da média e existe maior representatividade dos valores na zona de maior concentração de COT.

Figura 5.17. Gráfico de caixa para as concentrações de carbono orgânico total (COT) na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



Fonte: própria do autor.

5.4.6 *Escherichia Coli* e coliformes totais

Nas Figuras 5.18 e 5.19 são apresentadas as concentrações de *E. coli* e coliformes totais monitoradas ao longo do experimento. A água bruta era contaminada com esgoto tratado coletado no decantador secundário da ETE São João Navegantes, em Porto Alegre. As concentrações mínima, média e máxima de *E. coli* na água bruta foram, respectivamente, 1614 NMP/100 mL, 2982 NMP/100 mL e 3945 NMP/100 mL. Com relação aos coliformes totais, as concentrações mínima, média e máxima na água bruta foram 2558 NMP/100 mL, 4358 NMP/100 mL e 8475 NMP/100 mL.

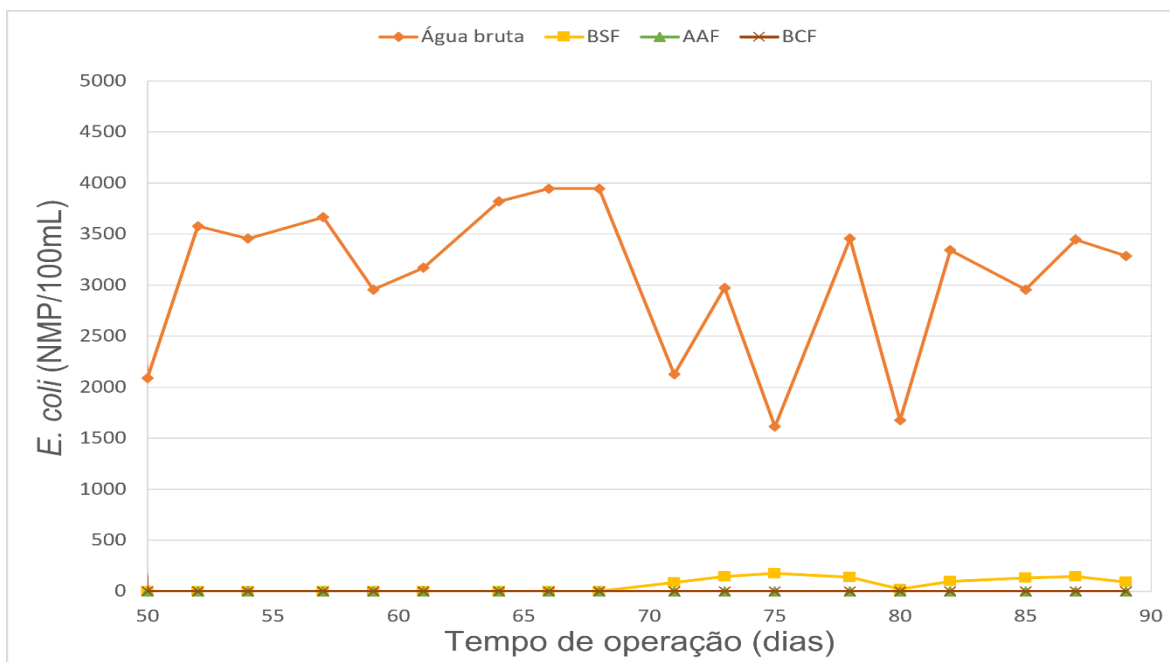
Houve uma certa oscilação das concentrações na água bruta devido variabilidade no efluente do decantador secundário, cuja coleta era feita semanalmente.

O efluente do BSF apresentou presença de *E. coli* e coliformes totais a partir do dia 71 de operação o que se manteve até o dia 89, quando o experimento foi finalizado.

Especificamente com o teste ANOVA, a probabilidade de 0,00 do AAF em duplicata (AAF1 e AAF2), do BCF em duplicata (BCF1 e BCF2), e das médias do AAF e BCF, foram

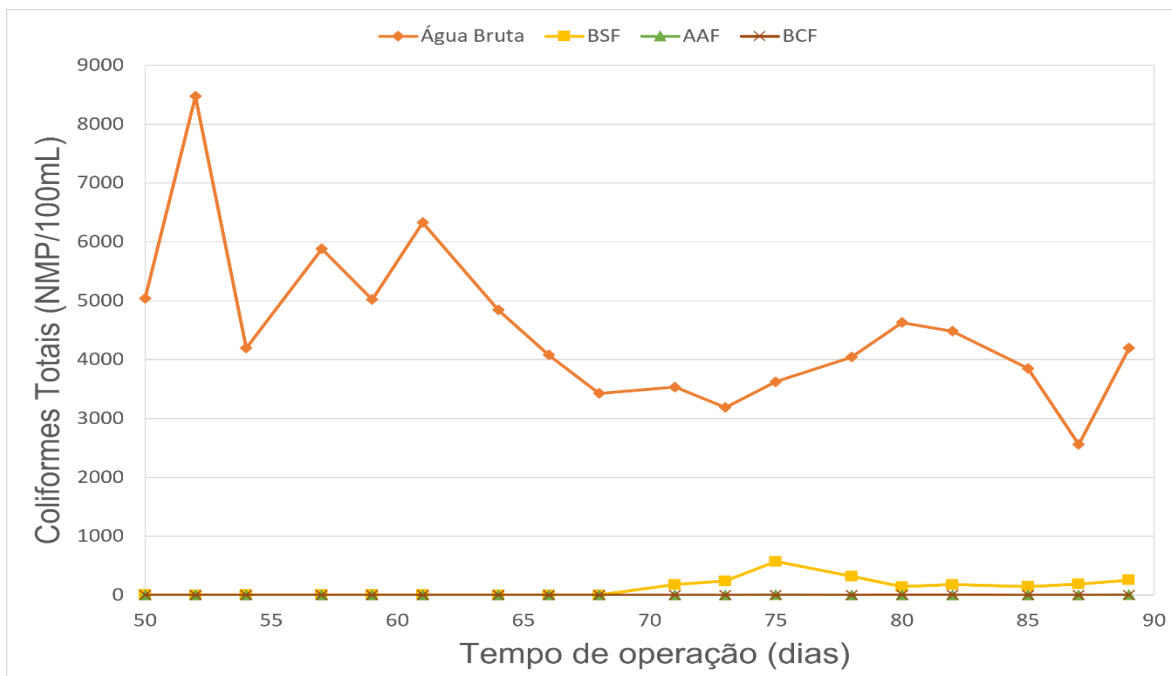
menores que o nível de significância de 0,05. Por tanto, a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que não todas as médias são iguais.

Figura 5.18. Concentrações de *E. coli* na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.



Fonte: própria do autor.

Figura 5.19. Concentrações de coliformes totais na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.

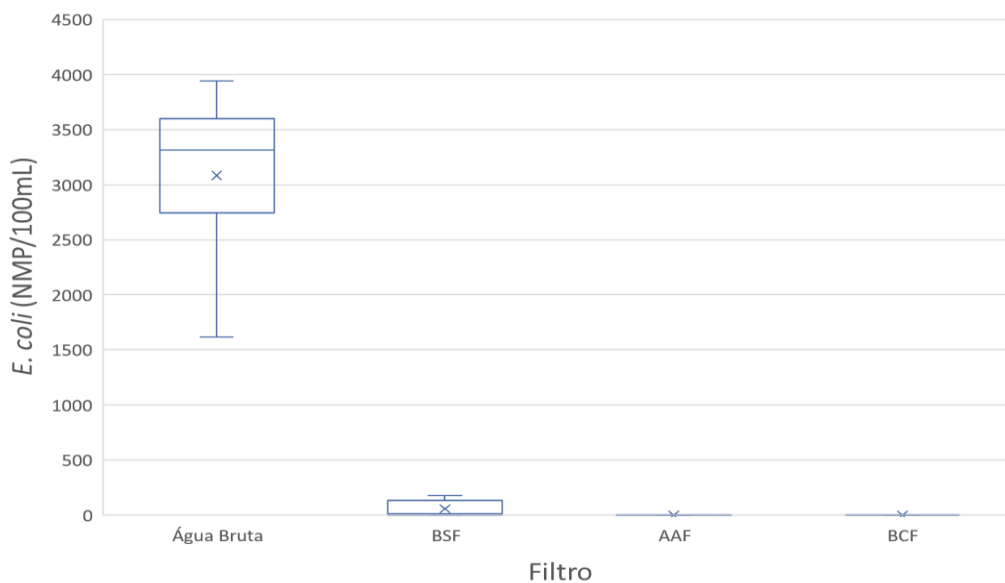


Fonte: própria do autor.

As concentrações de *E. coli* e coliformes totais no efluente do filtro AAF e BCF foram menores do que o limite de detecção do método (< 1) ao longo do experimento. Mesmo nos dias em que o efluente do filtro BSF apresentava presença dos microrganismos, estes eram removidos nos filtros AAF e BCF, resultando concentrações não detectáveis.

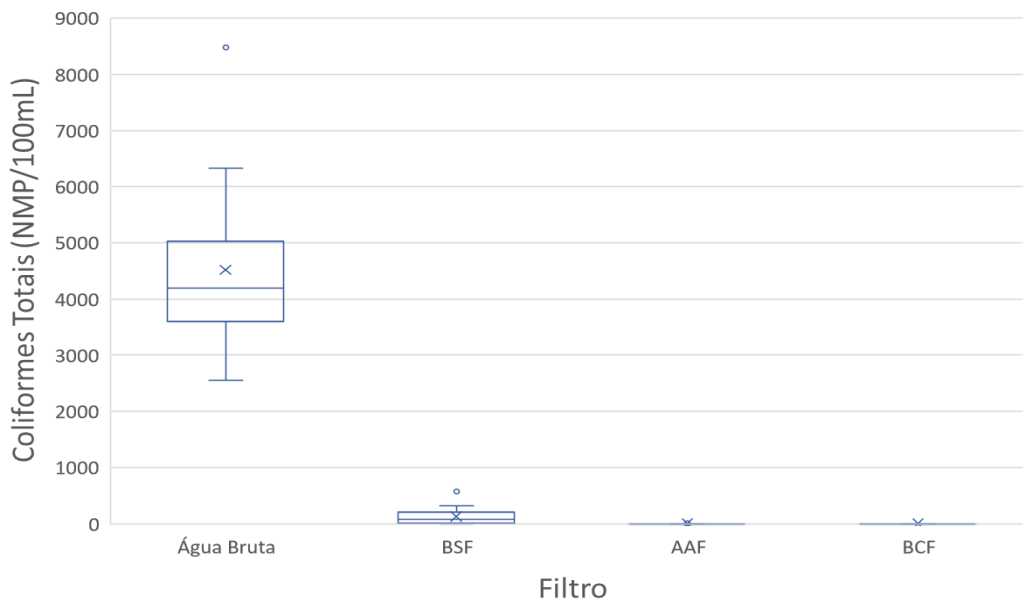
As Figura 5.20 e 5.21 apresentam os gráficos de caixas para os parâmetros *E. coli* e coliformes totais. Observa-se que houve maior variabilidade nas concentrações da água bruta em relação aos efluentes dos filtros.

Figura 5.20. Gráfico de caixa para concentrações de *E.coli* na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



Fonte: própria do autor.

Figura 5.21. Gráfico de caixa para concentrações de coliformes totais na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



Fonte: própria do autor.

Diversos estudos comprovam a eficiência do filtro BSF na remoção de *E. coli* e coliformes totais. Sobsey *et al.* (2006) constataram remoções de *E.coli* entre 93% e 99,7% em dois experimentos realizados. Estes autores observaram que as melhores eficiências de remoção ocorreram nos primeiros dias de operação do BSF, contradizendo a teoria segunda a qual a formação de biofilme melhora a sua eficiência. Manz (2019) também mediu remoções na faixa de 90% - 99% para bactérias e vírus, assim como 100% para parasitas. Jenkinsa *et al.* (2011) obtiveram remoções de 98,5% e 88,5% em termos de bactérias e vírus, respectivamente. Aiken *et al.* (2011) mediram remoções de *E. coli* e coliformes totais de, respectivamente, 88,4% e 88,7%.

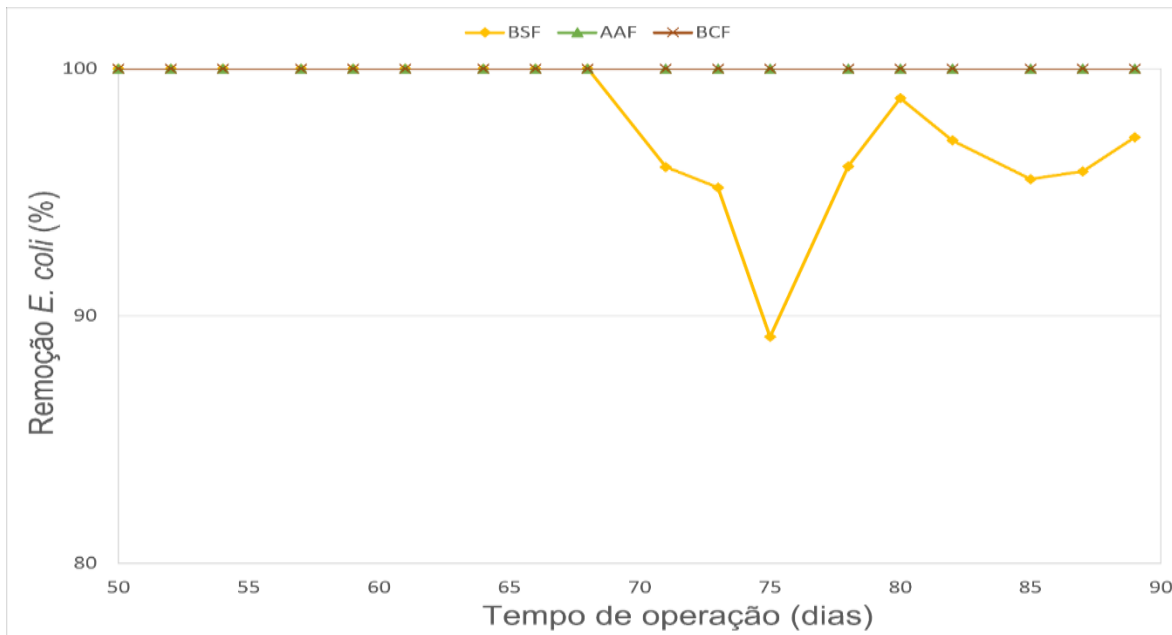
A Tabela 5.5 apresenta as eficiências de remoções mínimas, médias (geométricas) e máximas de *E.coli* do BSF, AAF y BCF. Na Figura 5.22 são apresentadas as eficiências ao longo do período de operação dos filtros. Embora o BSF tenha apresentado remoções inferiores a 100%, os valores obtidos confirmam o seu funcionamento para a remoção significativa de *E. coli*. É importante observar que o AAF e BCF complementaram o filtro BSF, atingindo 100% na remoção de *E. coli*.

Tabela 5.5. Eficiências mínima, média e máxima de remoções de *E. coli* nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).

Remoção de <i>E.coli</i>			
Eficiência	BSF	AAF	BCF
Mínima	89,1%	100,0%	100,0%
Média	97,8%	100,0%	100,0%
Máximo	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: própria do autor.

Figura 5.22. Eficiências de remoções de *E. coli* nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) ao longo do tempo de operação.



Fonte: própria do autor.

A Tabela 5.6 apresenta os percentuais mínimos, médios (geométrica) e máximos alcançados pelos filtros BSF, AAF e BCF na remoção de coliformes totais. A Figura 5.23 apresenta remoções médias graficamente.

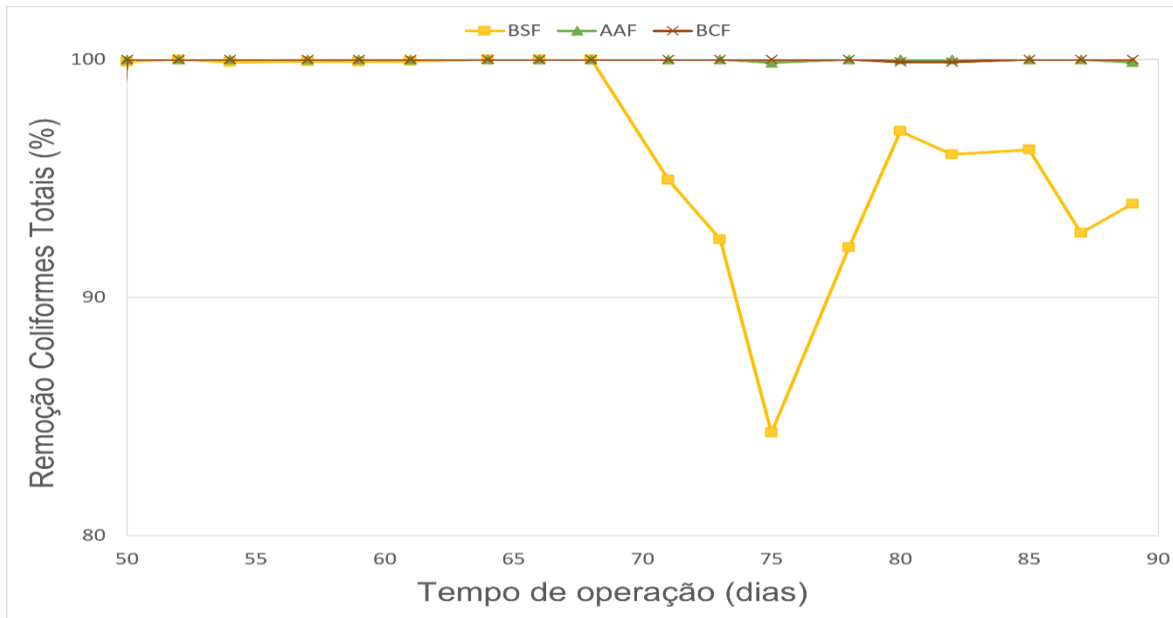
Quando comparados os resultados das concentrações finais de *E.coli* e coliformes totais nos três filtros implementados no processo, verifica-se a alta remoção do sistema em termos de remoção de bactérias indicadoras de contaminação da água. Neste caso, o AAF e BCF complementaram a remoção do BSF, embora não tenham sido colocados para remoção microbiológica e sim de fluoreto. Em relação ao filtro biosand, as remoções de coliformes totais e *E.coli* foram compatíveis àquelas observadas em outros estudos com BSF.

Tabela 5.6. Eficiência mínima, média e máxima de remoção de coliformes totais nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).

Remoção de Coliformes Totais			
Eficiência	BSF	AAF	BCF
Mínima	84,3%	99,9%	99,9%
Média	96,6%	99,9%	99,9%
Máximo	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: própria do autor.

Figura 5.23. Eficiência de remoção de coliformes totais nos filtros BSF, AAF e BCF.



Fonte: própria do autor.

5.4.7 Turbidez

A Figura 5.24 apresenta os valores de turbidez, medidos diariamente, ao longo do experimento. A linha azul representa o fim dos primeiros 45 dias de operação. A turbidez da água afluenta manteve-se em torno de 25 UNT, metade do valor máximo recomendado pelo Centre for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST) para garantir o comportamento adequado do filtro BSF.

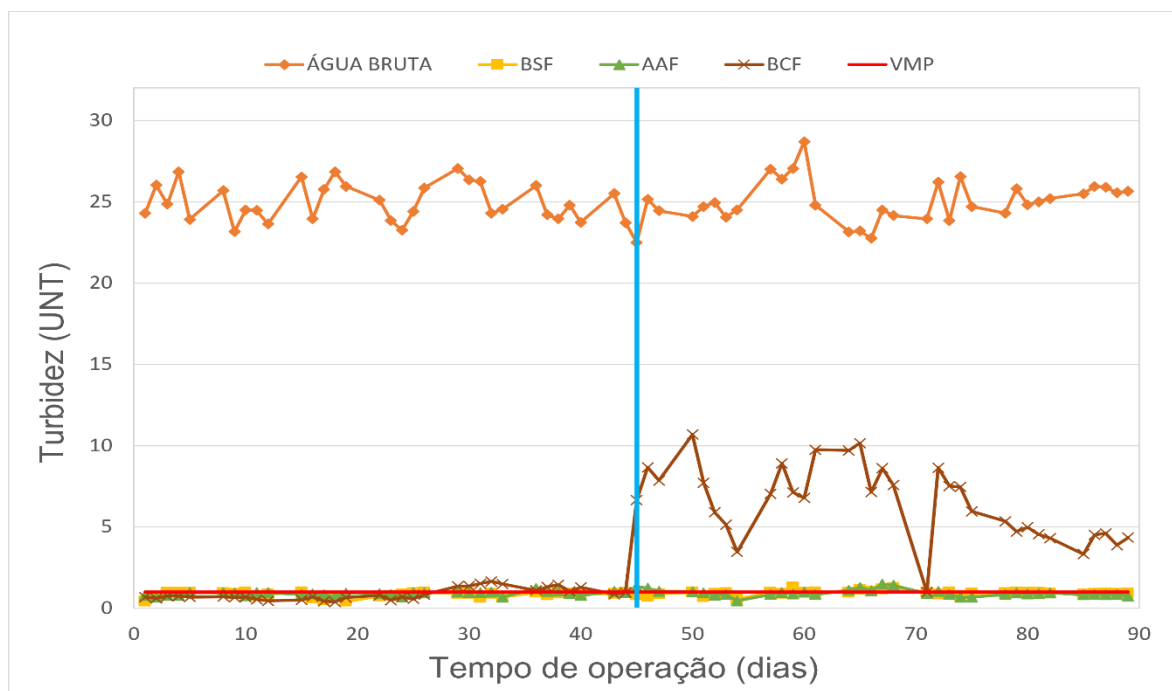
A eficiência de remoção da turbidez no filtro BSF permaneceu 94,4% do tempo com valores abaixo de 1 UNT, requerido para qualidade da água para consumo humano pela Portaria N°888/2021 do Ministério da Saúde. Os valores médio, mínimo e máximo foram, respectivamente, 0,87 UNT, 0,43 UNT e 1,28 UNT. Os valores de turbidez no efluente do BSF tiveram baixa amplitude ao longo do experimento com distância interquartil de 0,16 UNT (Figura 5.25).

A turbidez no efluente do AAF apresentou 84,3 % das medições abaixo do limite máximo permitido de 1,0 UNT. Os valores mínimo, médio e máximo foram, respectivamente, 0,45 UNT, 0,90 UNT e 1,23 UNT. A distância interquartil do AAF foi de 0,15 UNT valor próximo do desvio padrão.

Especificamente com o teste ANOVA, a probabilidade de 2,07E-10 das médias do AAF e BCF, foram menores que o nível de significância de 0,05. Por tanto, a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que não todas as médias são iguais.

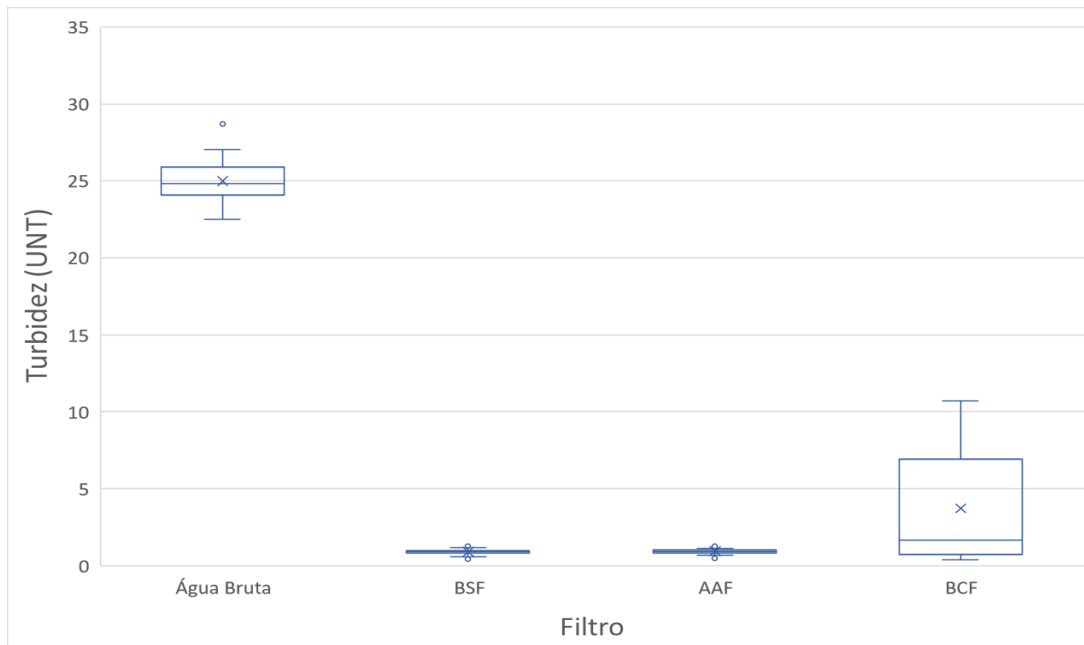
O BCF apresentou maior variação nos valores de turbidez ao longo do experimento (Figuras 5.24 e 5.25). Os valores permaneceram próximos a 1,0 UNT até o dia 45. A partir daí a turbidez se manteve acima de 1,0 UNT até o fim da operação. A razão para esta alteração pode ter sido o esgotamento da capacidade do filtro em remover turbidez. Para verificar esta hipótese, seria necessária a realização de uma retrolavagem, contudo, o sistema não foi projetado para esse procedimento. Por isso, decidiu-se continuar a operação, acompanhando a evolução da turbidez ao longo do tempo.

Figura 5.24. Valores de turbidez na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação.



Fonte: própria do autor.

Figura 5.25. Gráfico de caixa para valores de turbidez na água bruta e efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



Fonte: própria do autor.

A remoção de turbidez em filtros BSF tem sido estudada por diversos autores. Sobsey *et al.* (2006), mediram remoção de turbidez de 84,0%. Jenkinsa *et al.* (2011), observaram remoção de 89,0%. No entanto, Aiken *et al.* (2011) verificaram remoção de apenas 29,5%. Esta baixa remoção foi atribuída aos baixos valores de turbidez no afluente. O BSF tem melhor desempenho com valores de turbidez iniciais mais elevados, desde que não ultrapassem os 50 UNT (CAWST, 2012).

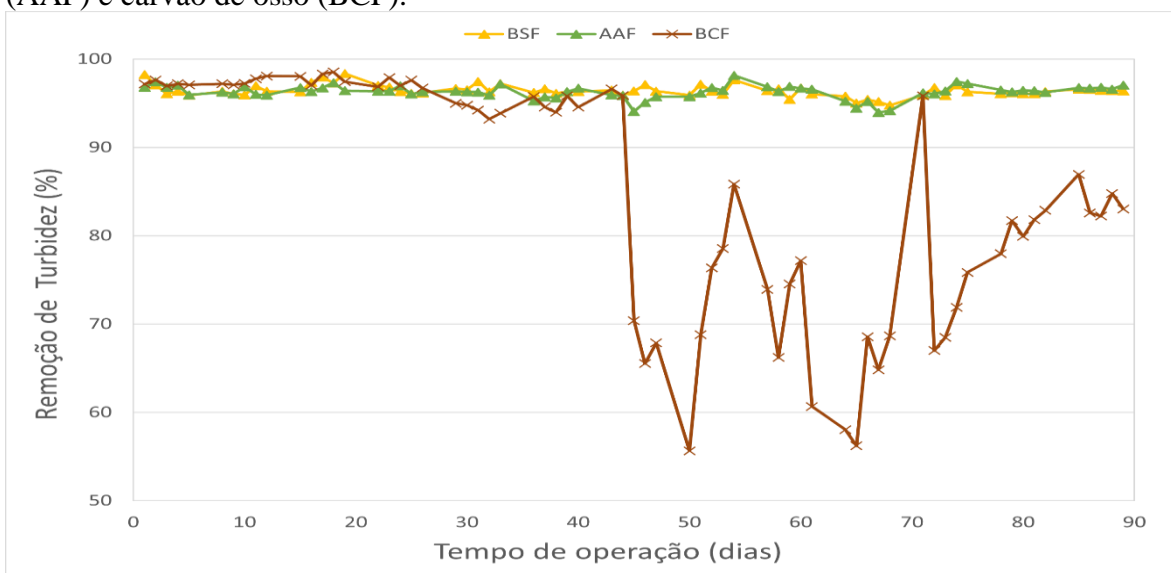
No experimento, os filtros BSF e AAF apresentam remoções médias de turbidez equivalentes, próximas a 96% (Tabela 5.7). O BSF apresentou a melhor eficiência média em comparação com os filtros AAF e BCF. No filtro de alumina ativada (AAF), a diferença entre os valores de remoções mínima e máxima foram, respectivamente, 94,0%, e 98,1%. Portanto, com o carvão de osso como material adsorvente, houve a limitação de apresentar aumento na turbidez após um período de operação. No entanto, a alumina ativada como matéria adsorvente não altera a turbidez no sistema, podendo-se utilizar em série ao BSF.

Tabela 5.7. Eficiências mínimas, médias e máximas de remoções de turbidez nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF), antes e após 45 dias de operação.

Remoção de Turbidez (%)			
Eficiência (%) antes do dia 45	BSF	AAF	BCF
Mínima	95,91	95,27	93,21
Média	96,66	96,37	96,47
Máximo	98,35	97,40	98,54
Eficiência (%) depois do dia 45	BSF	AAF	BCF
Mínima	94,76	93,96	55,66
Média	96,22	96,17	73,97
Máximo	97,66	98,14	95,85

Fonte: própria do autor.

Figura 5.26. Eficiência de remoção de turbidez nos filtros biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



Fonte: própria do autor.

5.4.8 Fluoreto

O fluoreto foi um dos principais parâmetros do experimento. Os AAF e BCF foram especificamente instalados com o intuito de remover concentrações de fluoreto na água bruta. O íon era analisado diariamente, conforme descrito na seção de metodologia. A Figura 5.27

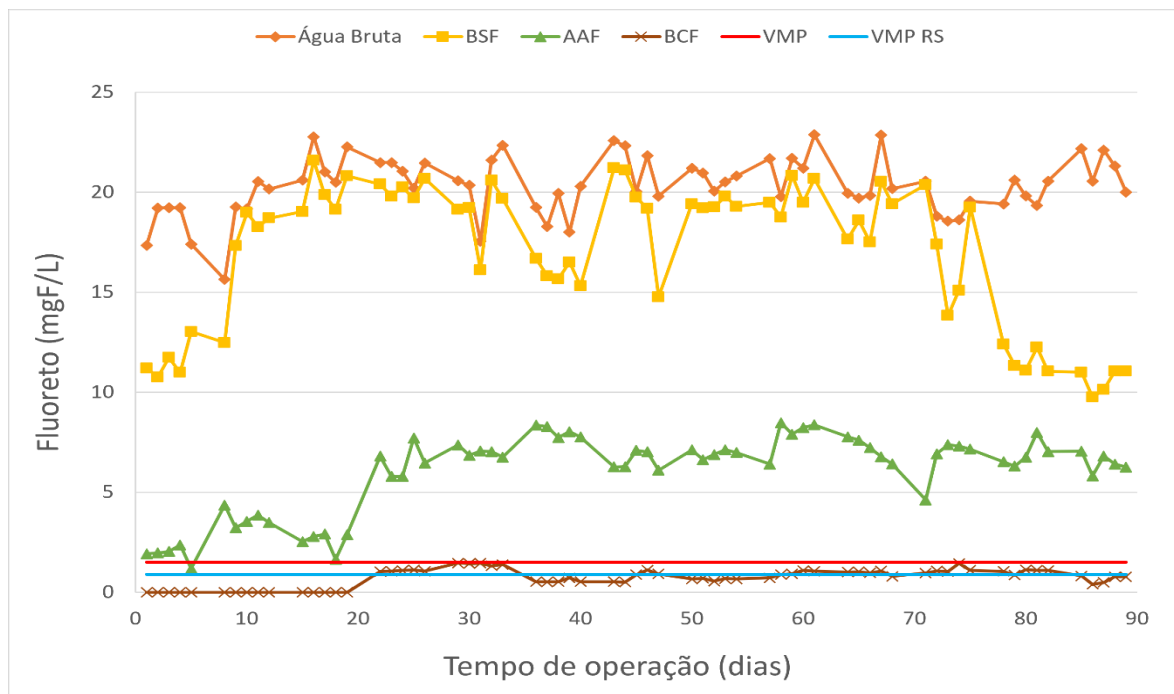
apresenta as concentrações do íon fluoreto medidas ao longo do tempo de operação, bem como os valores máximos permitidos estabelecidos na Portaria de Potabilidade nº 888/2021 e Portaria nº 10/1999, da Secretaria de Saúde do Rio Grande do Sul. As remoções de fluoreto alcançadas pelos dois adsorventes usados foram diferentes, conforme discutido a seguir.

As concentrações de fluoreto no efluente do AAF variaram entre 1,20 mg/L e 8,5 mg/L. No BCF, as concentrações foram próximas ou abaixo da concentração máxima permitida em água para consumo humano, 1,5 mg/L (BRASIL, 2021).

Ao longo das primeiras três semanas do experimento, o carvão de osso apresentou remoção de 100% na concentração de fluoreto. O comportamento do BCF foi constante ao longo do experimento, sem apresentar mudanças significativas. As concentrações mínima, média e máxima foram, respectivamente, 0,41 mg F/L, 0,84 mg F/L e 1,47 mg F/L, com distância interquartil de 0,61 mg/L.

As concentrações do íon fluoreto no efluente do BF foram próximas às da água bruta, exceto nos primeiros 8 dias e últimos 10 dias, quando foi cerca de 50% menor, provavelmente por causa da saturação do material devido a exposição a altas concentrações. O BSF não tem a finalidade de remover fluoreto, e esta foi a motivação deste estudo para adicionar AAF e BCF como pós-tratamento do BSF.

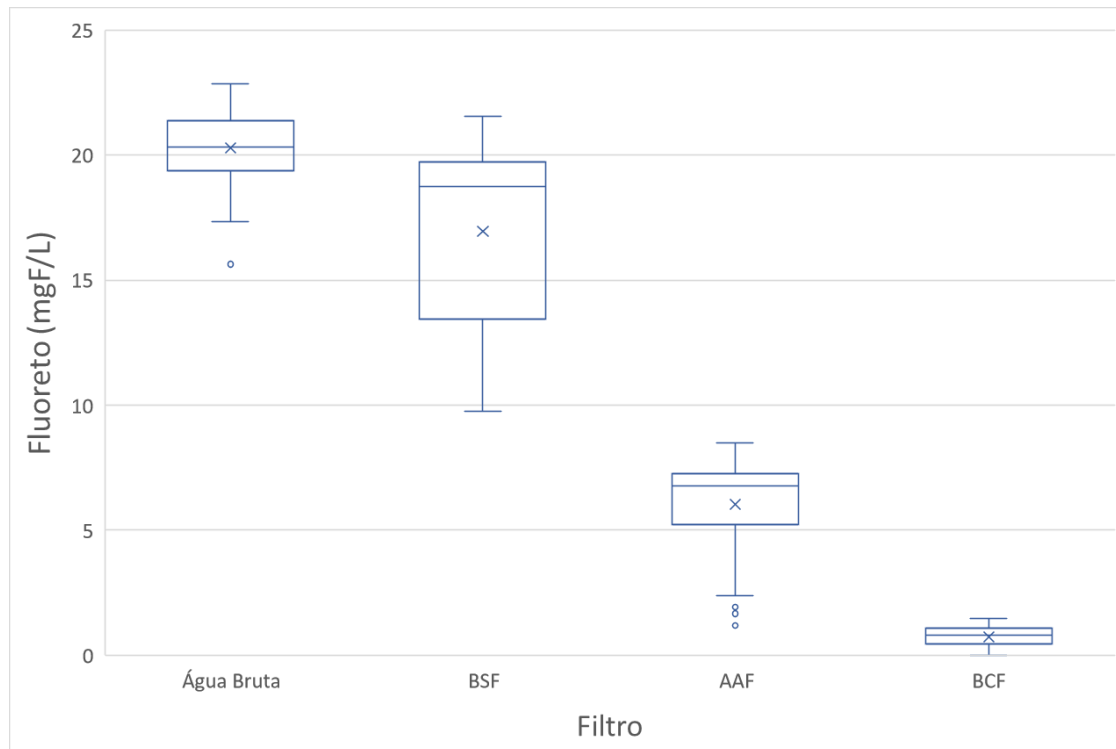
Figura 5.27. Concentrações de fluoreto na água bruta e no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF) em função do tempo de operação do sistema.



Fonte: própria do autor.

A Figura 5.28 apresenta o gráfico de caixa para as concentrações do íon fluoreto no efluente do filtro do sistema de tratamento. Observa-se a baixa amplitude do filtro BCF e a maior no filtro AAF.

Figura 5.28. Gráfico de caixa para as concentrações de fluoreto no efluente do filtro biosand (BSF), alumina ativada (AAF) e carvão de osso (BCF).



Fonte: própria do autor.

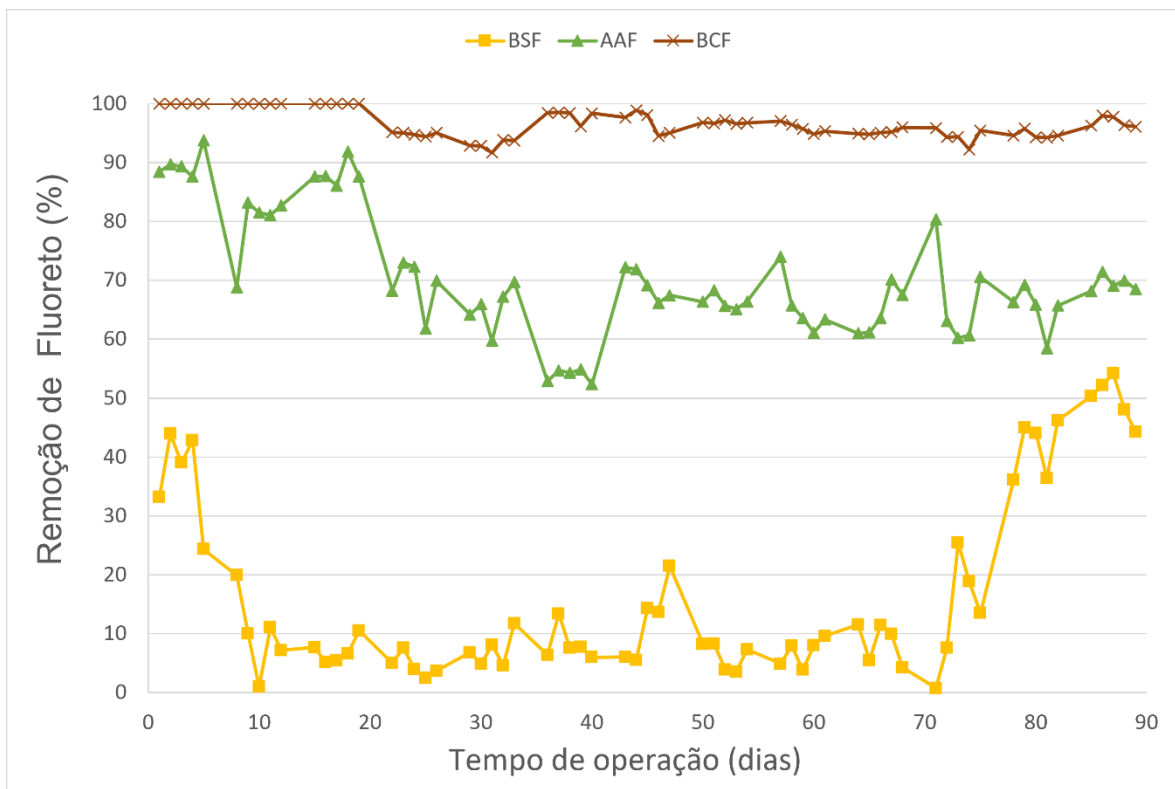
A Figura 5.29 e a Tabela 5.8 mostram as eficiências de remoção do fluoreto nos BSF, AAF e BCF. Destaca-se o BCF, com eficiência média de 97%, nunca sendo inferior a 92%. As eficiências de remoção mínima, média e máxima do AAF foi menor do que as do BCF, respectivamente de 52,4%, 70,3% e 93,8%. Embora a remoção máxima tenha sido elevada, o AAF não atingiu ao longo do experimento a concentração de 1,5 mg F/L, máximo admitido para a água potável. Contudo, ressalta-se que a concentração de fluoreto no afluente, 20 mg/L, era semelhante do que os teores descritos na bibliografia como normalmente encontradas em águas de poços contendo flúor acima do padrão estabelecido.

O pH é um dos parâmetros mais importantes na remoção de flúor na água por adsorção na alumina ativada e no carvão de osso. Para alumina ativada, o pH deve estar na faixa entre 5,0 e 6,0 uma vez que, em $\text{pH} > 7$, os silicatos (SiO_4^{4-}) e os hidróxidos (OH^-) tornam-se competidores diretos dos íons de flúor, enquanto em $\text{pH} < 5$ ocorre dissolução da estrutura da alumina (BISHOP; SANSOUCY, 1978). O pH nos efluentes do AAF e BCF

foram, entre 10 e 12. Talvez isto pode ter afetado a adsorção do fluoreto na alumina, entretanto o pH não afetou a remoção no carvão.

As remoções de fluoreto no BSF foram baixas, na ordem de 5-10% em relação água bruta, com variações significativas entre os primeiros 10 dias e últimos 15 dias de operação.

Figura 5.29. Eficiência de remoção de fluoreto nos filtros BSF, AAF e BCF.



Fonte: própria do autor.

Tabela 5.8. Eficiências mínima, média e máxima de remoção de fluoreto nos filtros BSF, AAF e BCF.

Remoção de Fluoreto			
Eficiência	BSF	AAF	BCF
Mínima	0,76	52,37	91,69
Média	16,30	70,25	96,66
Máximo	54,15	93,77	100,00

Fonte: própria do autor.

Fawell *et al.* (2006), relacionam o uso do carvão de osso como o mais antigo agente de desfluoretação da água conhecido. O carvão de osso foi usado em diversos estudos que

comprovam a eficiência do material na remoção do íon da água. Sobre a alumina ativada, os referidos autores referem, baseados em experiências de campo, que a capacidade de remoção é de cerca de 1mg F/g carvão. Feenstra; Vasak; Griffioen (2007), afirmam que a explicação para esta variação na capacidade de adsorção pode ser atribuída a sua dependência do pH, mencionando que o valor ideal situa-se em torno de 5. Estes autores observaram que o carvão de osso apresenta eficiências de remoções altas, logrando reduzir a concentração de flúor para menos o igual a 1mg F/L.

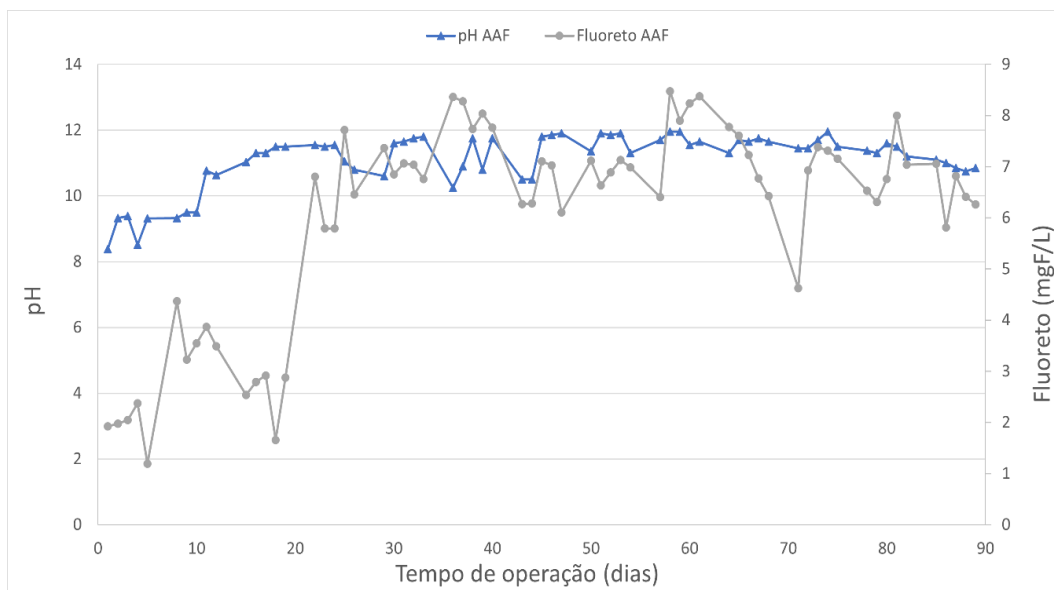
Trabalhando com carvão produzido de ossos de peixes, Bhatnagar *et al.* (2011), indicaram uma remoção e capacidade de adsorção de fluoreto de respectivamente, 71% e 0,75 mg/g. Neste sentido, a capacidade de remoção do carvão de osso bovino é mais alta. No mesmo estudo, os autores apresentam resultados em termos de capacidade de adsorção na alumina ativada de 1,45 mg/g, resultado obtido em pH 7.

Habuda-stanić *et al.* (2014), apresentam resultados que mostraram que maiores capacidades de adsorção de íons fluoretos ocorrem com óxidos e hidróxidos metálicos e suas combinações. Além disso, confirmaram eficiências de 97% na remoção de flúor em carvão de osso, a partir de soluções com concentração de 10 mg F/L e pH 7,25.

A Figura 5.30 apresenta, a relação entre as concentrações de fluoreto e valores de pH ao longo da operação do filtro de alumina ativada. A queda na eficiência de remoção ocorreu a partir do dia 15 e manteve-se até o final.

Segundo estudos realizados por Bishop; Sansoucy (1978), os silicatos e íons hidroxila são considerados competidores altamente fortes com os íons fluoreto por sítios de troca de alumina em pH maiores de 7, enquanto, em pH menores de 7, os complexos solúveis de alumino fluoro são formados, resultando na presença de íons de alumínio na água tratada.

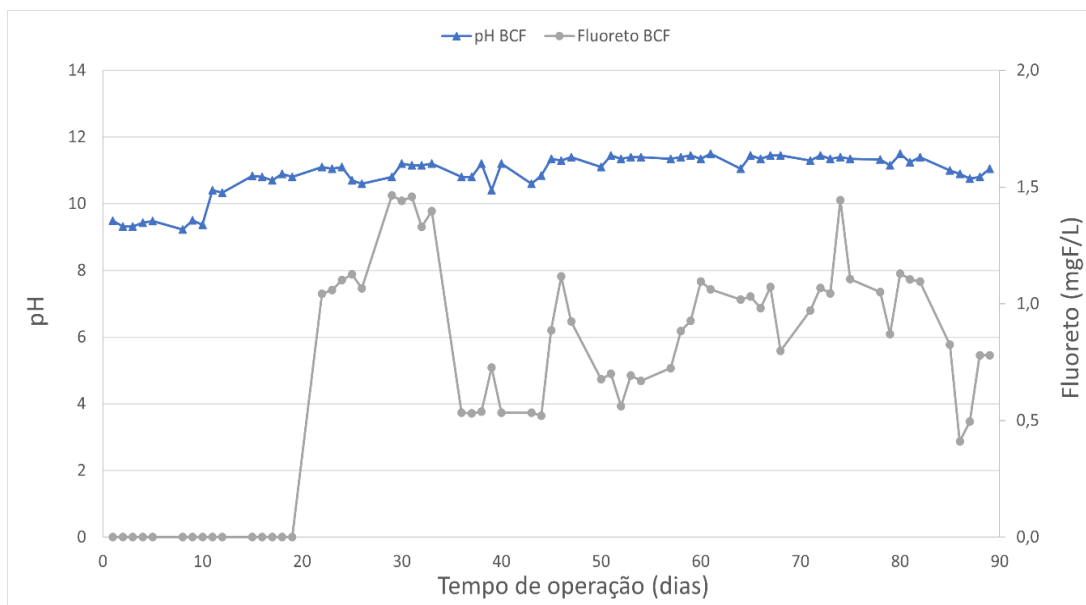
Figura 5.30. Relação do pH e concentração de fluoreto no filtro de alumina ativada.



Fonte: própria do autor.

A Figura 5.31 ilustra os valores de pH e porcentagens de remoção do fluoreto no filtro de carvão de osso. Observa-se, neste caso, que o pH elevado não afetou a eficiência, que alcançou 100% nos primeiros 19 dias de operação e sempre mantendo-se acima de 90%.

Figura 5.31. Relação do pH e concentração de fluoreto no filtro de carvão de osso.



Fonte: própria do autor.

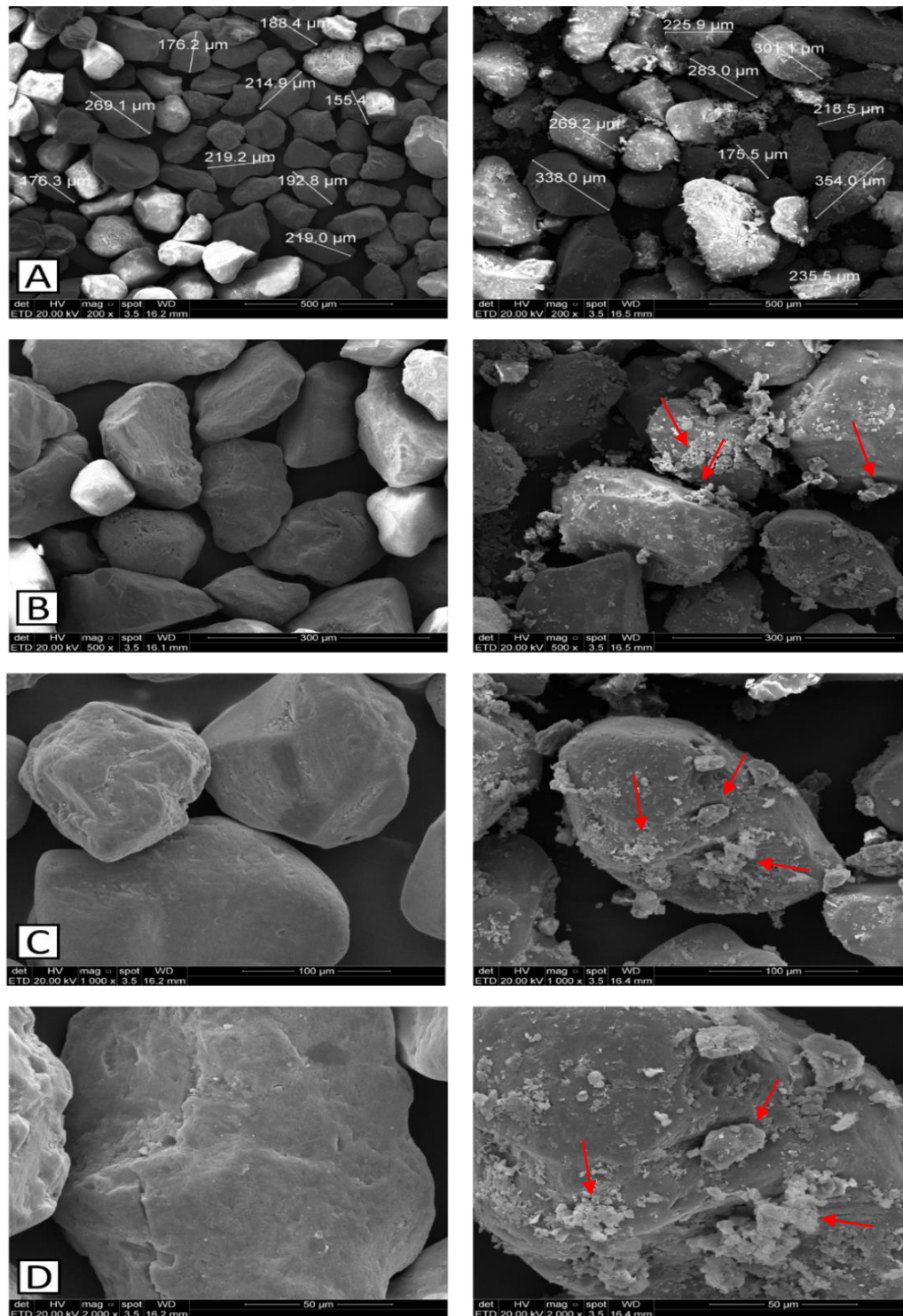
5.4.9 Biofilme

O biofilme foi analisado em amostras de areia retiradas do BSF em 4 locais: areia limpa, na superfície do BSF, e a 1 cm e 20 cm abaixo da camada superficial. Estas amostras foram denominadas MEV1, MEV2, MEV3, MEV4, respectivamente. No AAF foram analisadas 3 amostras: alumina ativada limpa (MEV5), da superfície (MEV6) e do fundo (MEV7). Do BCF também foram analisadas 3 amostras: carvão de osso limpo (MEV8), das camadas superficiais (MEV9) e de fundo (MEV10). Todas as amostras foram analisadas em duplicata e em magnitudes de 70 x, 100 x, 200 x, 500 x, 1000 x e 2000 x. Os biofilmes foram visualizados com MEV.

Healy *et al.*, (2011), observaram o crescimento de biofilme utilizando MEV em estudo com tempo de operação de 525 dias. Relataram que a principal formação do biofilme se deu na profundidade de 0,03 m abaixo da superfície do filtro, diminuindo de forma gradual com o aumento da profundidade.

Na Figura 5.32, pode se observar a diminuição da presença do biofilme comparando duas amostras, MEV1 (esquerda da figura) e MEV2 (direita da figura), em 4 diferentes magnitudes: 200 x, 500 x, 1000 x e 2000 x. Na magnitude de 200 x aparece, também, a dimensão dos grãos.

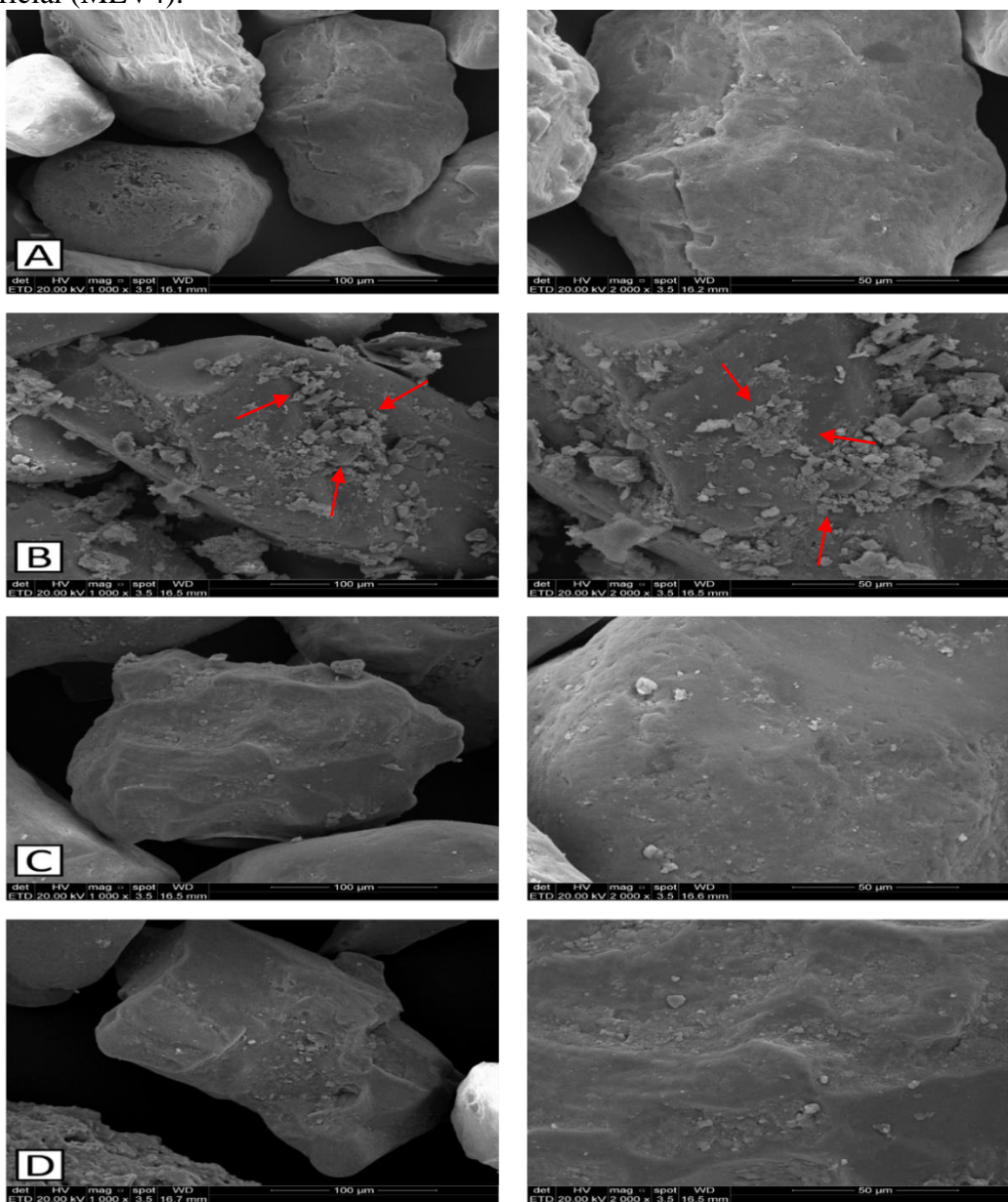
Figura 5.32. Fotomicrografias das amostras de areia limpa (MEV1, à esquerda) e da superfície da camada de areia filtrante (MEV2, à direita) do filtro biosand (BSF). As letras A, B, C e D são os aumentos de 200 x com medidas dos grãos (A), 500 x (B), 1000 x (C) e 2000 x (D).



Fonte: própria do autor.

Na Figura 5.33 são apresentadas micrografias das amostras MEV1, MEV2, MEV3 e MVE4. Foram comparadas as imagens resultantes, em dois aumentos distintos, 1000x e 2000x, respectivamente. Observa-se que há uma diminuição na presença de biofilmes com o aumento da profundidade.

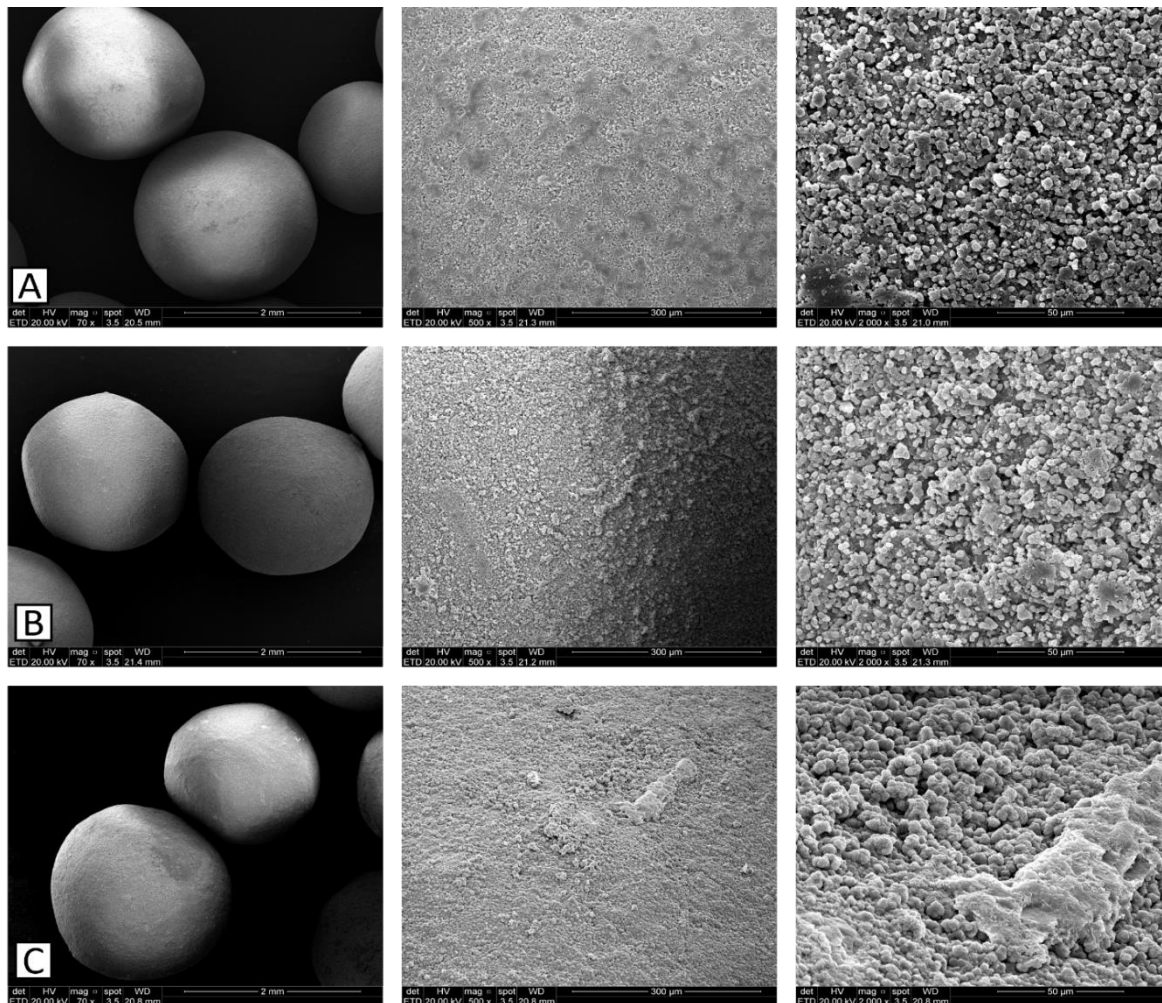
Figura 5.33. Fotomicrografias de MEV do filtro biosand (BSF) com aumentos de 1000 x (esquerda) e 2000 x (direita). A – areia limpa (MEV1); B – superfície da camada de areia (MEV2); C – 1 cm abaixo da camada superficial (MEV3) e D – 20 cm abaixo da camada superficial (MEV4).



Fonte: própria do autor.

A Figura 5.34 apresenta as micrografias da alumina ativada limpa (MEV5), na superfície (MEV6) e fundo do filtro (MEV7) nas magnitudes 70 x, 500 x e 2000 x. Pode se observar maior crescimento de biofilme na amostra MEV7. A amostra da superfície (MEV6) apresentou leve alteração em comparação com a alumina ativada limpa (MEV5). Portanto, o maior crescimento do biofilme, deu-se próximo a crepina instalada na parte inferior do filtro. A presença de carbono orgânico no efluente do BSF poderia dar suporte ao crescimento de biofilme no AAF, embora se esperasse que este crescimento se desse na superfície, não na camada mais profunda. De qualquer forma, o principal objetivo do AAF era a remoção de fluoreto, no entanto, ele também contribui na remoção de coliformes e *E. coli*.

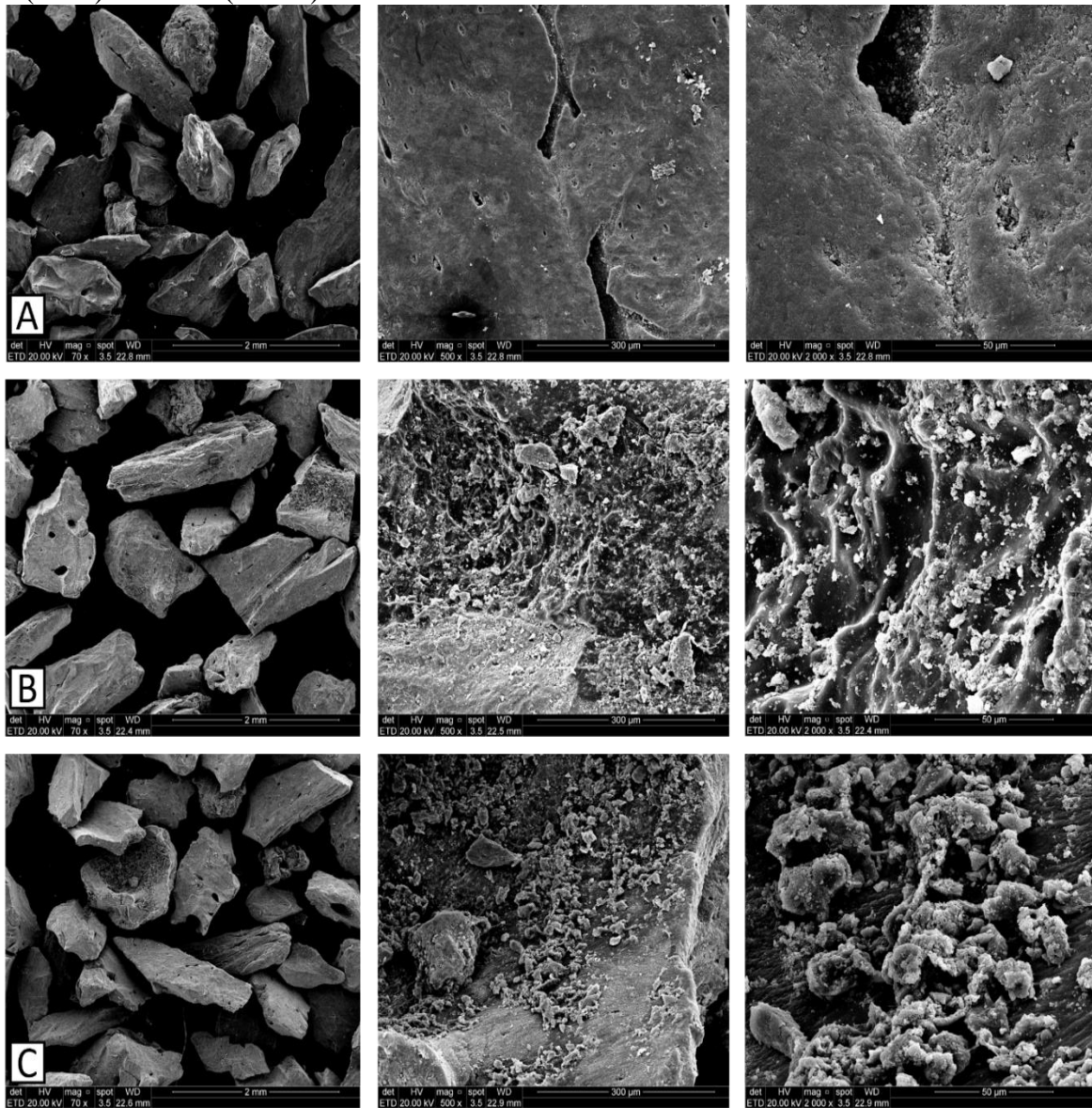
Figura 5.34. Fotomicrografias de MEV do AAF em aumentos de 70 x (esquerda), 500 x (meio) e 2000 x (direita). A – alumina ativada limpa (MEV5); B – alumina ativada da superfície (MEV6) e C – alumina ativada no fundo do filtro (MEV7).



Fonte: própria do autor.

A Figura 5.35 apresenta as fotomicrografias das amostras de carvão de osso limpo (MEV8), de carvão de osso na superfície do filtro (MEV9) e no fundo do filtro (MEV10). As amostras foram observadas em aumentos de 70 x, 500 x e 2000 x, representadas de esquerda à direita, respectivamente. Pode se observar que houve crescimento de biofilme tanto na superfície quanto no fundo do filtro. Este crescimento tem origem na disponibilidade de carbono orgânico biodegradável no efluente do BSF.

Figura 5.35. Fotomicrografias de amostras, A – carvão de osso limpo (MEV8); B – carvão na superfície (MEV9) e C – fundo do filtro (MEV10), com aumentos de 70 x (esquerda), 500 x (meio) e 2000 x (direita).



Fonte: própria do autor.

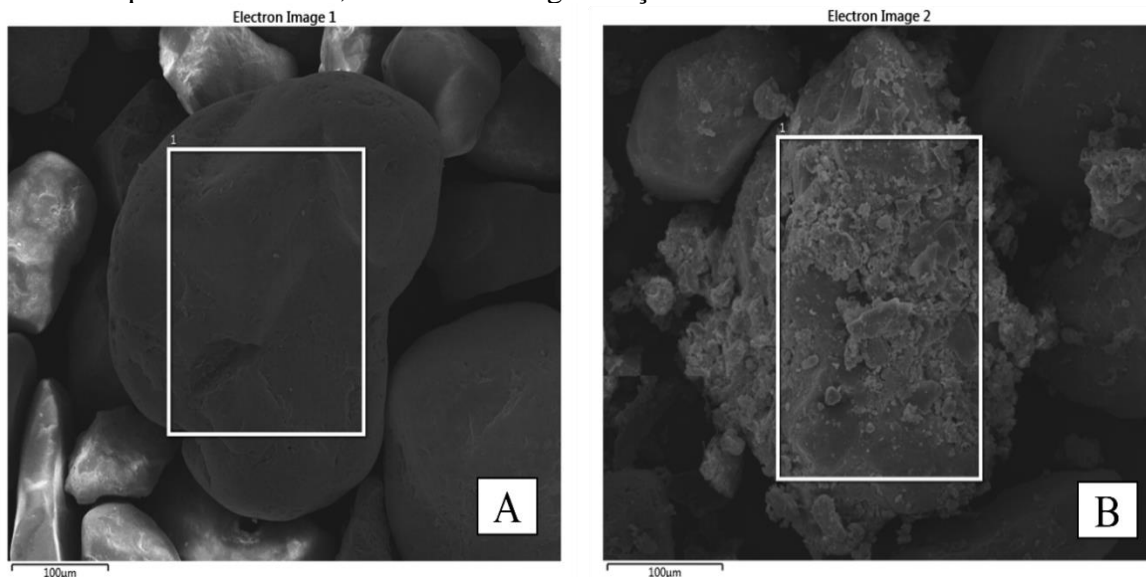
Desta forma, confirma-se que houve crescimento biológico nos AAF e BCF. Esta atividade biológica pode ter contribuído para a remoção adicional de *E. coli* e coliformes totais presentes no efluente do BSF. Destacando que embora não seja seu objetivo, a alumina ativada e o carvão de osso, tiveram crescimento biológico que contribuiu com o aperfeiçoamento dos resultados em termos de ausência de *E. coli* e coliformes totais.

5.4.10 Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva (EDS)

A Espectroscopia de Raios X de Energia Dispersiva permitiu a identificação de elementos presentes nas amostras de areia limpa (EDS1), areia da camada superficial do BSF (EDS2), alumina ativada limpa (EDS3) e do fundo do AAF (EDS4), carvão de osso limpo (EDS5) e do fundo do BCF (EDS6).

A Figura 5.36 destaca os locais onde foram feitas as análises de EDS em areia, nas micrografias com aumento de 1000 x.

Figura 5.36. Locais escolhidos para ensaios EDS, a) na areia limpa (EDS1) e b) na areia da camada superficial do BSF, ambas com magnificação de 1000 x.

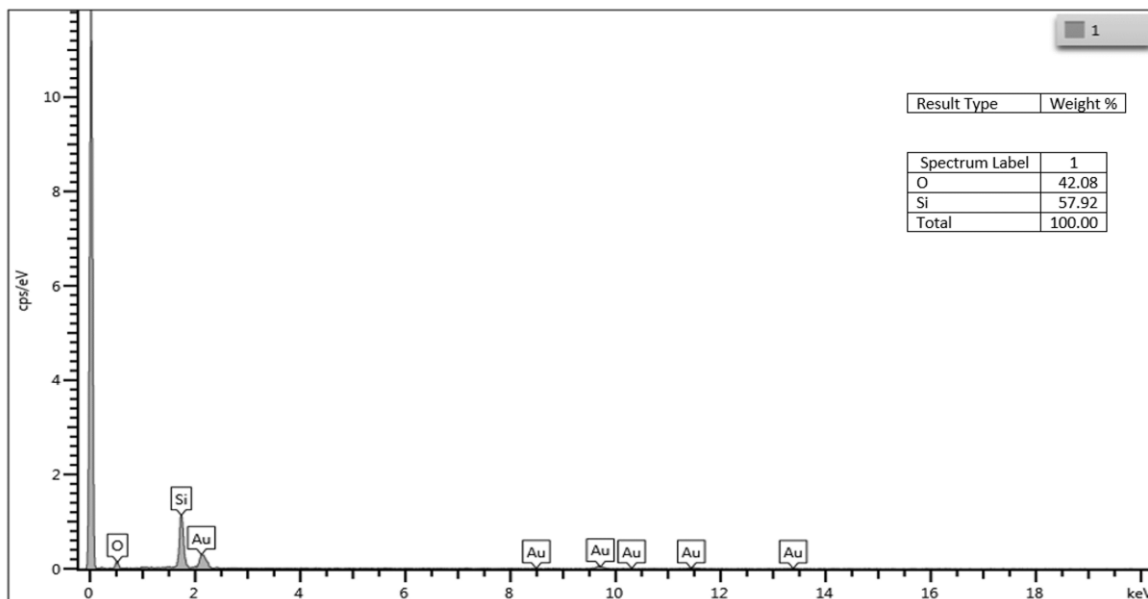


Fonte: própria do autor.

As Figuras 5.37 e 5.38 apresentam os picos de energia das duas amostras. Observa-se que, na areia limpa, os picos de silício e oxigênio formam, respectivamente, 58% e 42% da amostra. Já na amostra da areia na superfície BSF (EDS 2), o teor de oxigênio aumentou para 53,3% enquanto o silício reduziu para 32,1%. Na amostra EDS2, novos elementos apareceram, como o flúor (0,65%), magnésio (0,27%), cálcio (0,09%) e alumínio (13,59%). A origem do alumínio possivelmente tem origem na água da torneira, uma vez que ele é

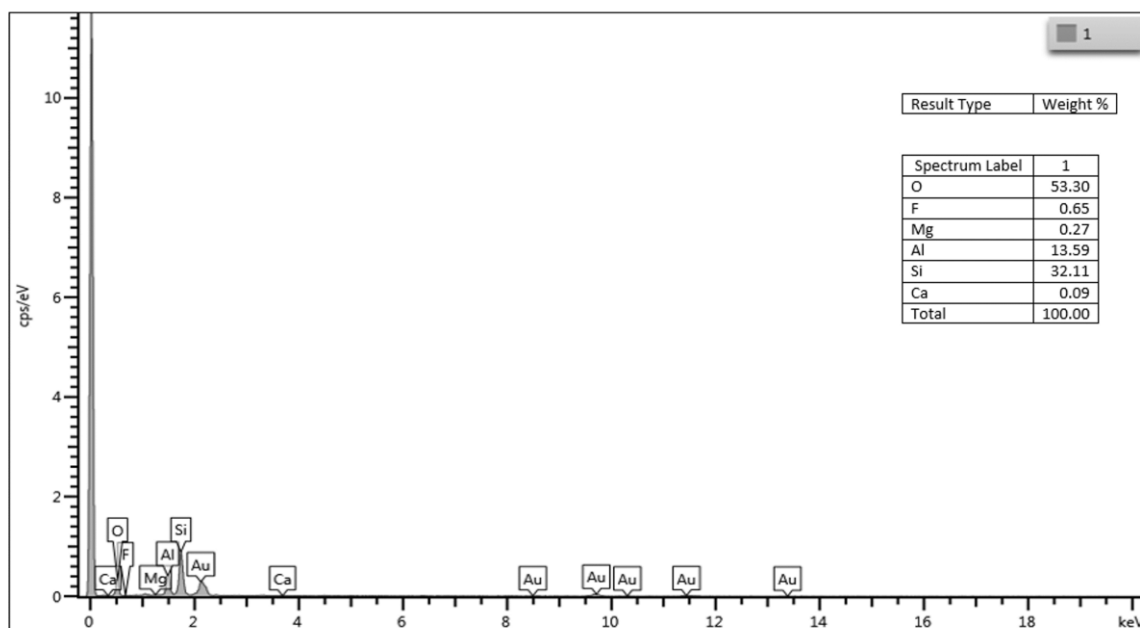
usado como coagulante para remoção de partículas coloidais. O flúor decorre de sua adição na água bruta afluente ao filtro. Os novos elementos correspondem ao 14,6% da areia da camada superficial do BSF.

Figura 5.37. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de areia limpa usada no filtro biosand (EDS1).



Fonte: própria do autor.

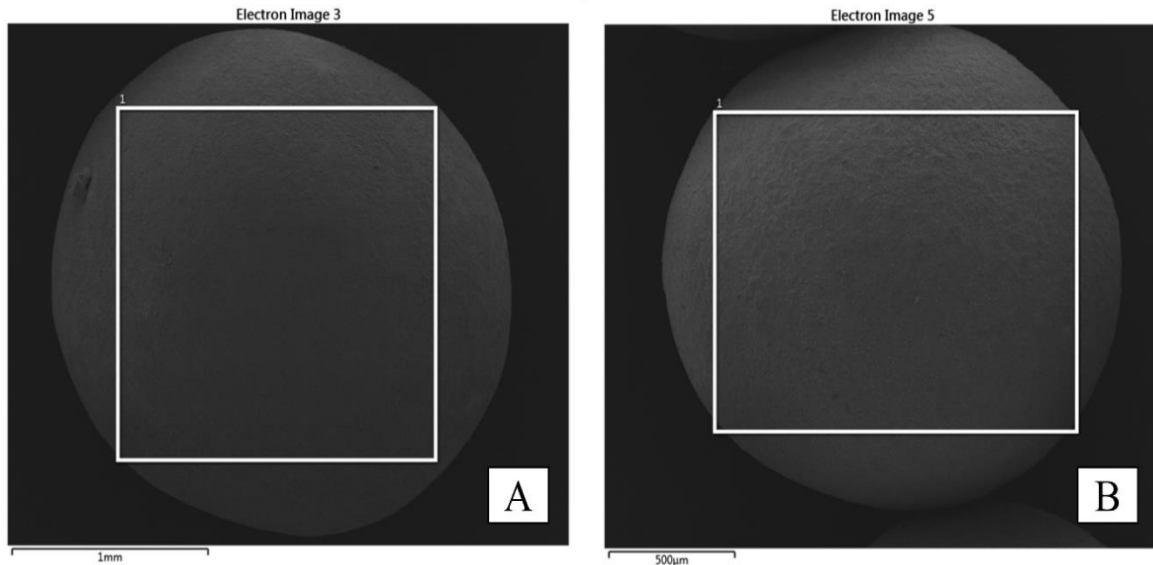
Figura 5.38. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de areia da superfície do filtro biosand (EDS2).



Fonte: própria do autor.

A Figura 5.39 apresenta os locais onde foram feitas as análises de EDS na alumina ativada limpa e do fundo do filtro, nas micrografias com aumento de 1000 x.

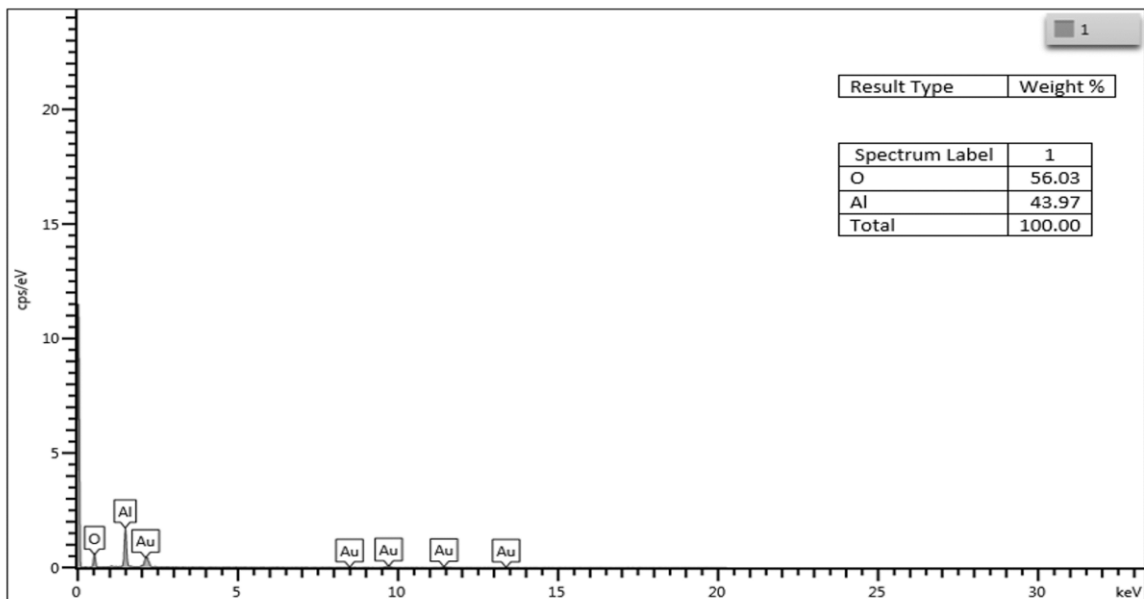
Figura 5.39. Locais de amostragem para os ensaios EDS: a) alumina ativada limpa (EDS3) e b) alumina ativada do fundo do filtro (EDS4).



Fonte: própria do autor.

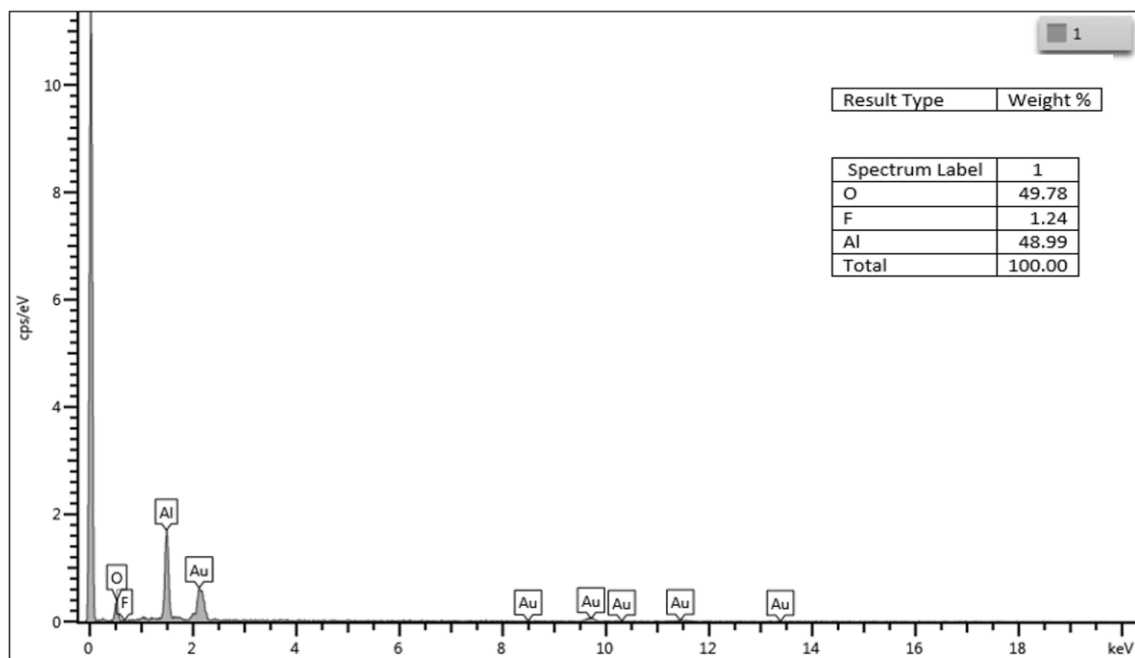
Os picos de energia resultantes das amostras EDS3 e EDS4, são apresentados nas Figuras 5.40 e 5.41, respectivamente. Na amostra de AA limpa, as presenças de alumínio e oxigênio compõem 100% dos picos. A presença elevada do alumínio decorre da própria composição química do material. Já na amostra da AA coletada no fundo do filtro (EDS4), aparece flúor, com 1,24% do pico total de energia. A AA tinha o objetivo de remover o íon fluoreto da água. Houve redução na contribuição do oxigênio e aumento na de alumínio. A alumina ativada foi implementada como material adsorvente de flúor, o que é mostrado na análise de EDS.

Figura 5.40. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de alumina ativada limpa (EDS3).



Fonte: própria do autor.

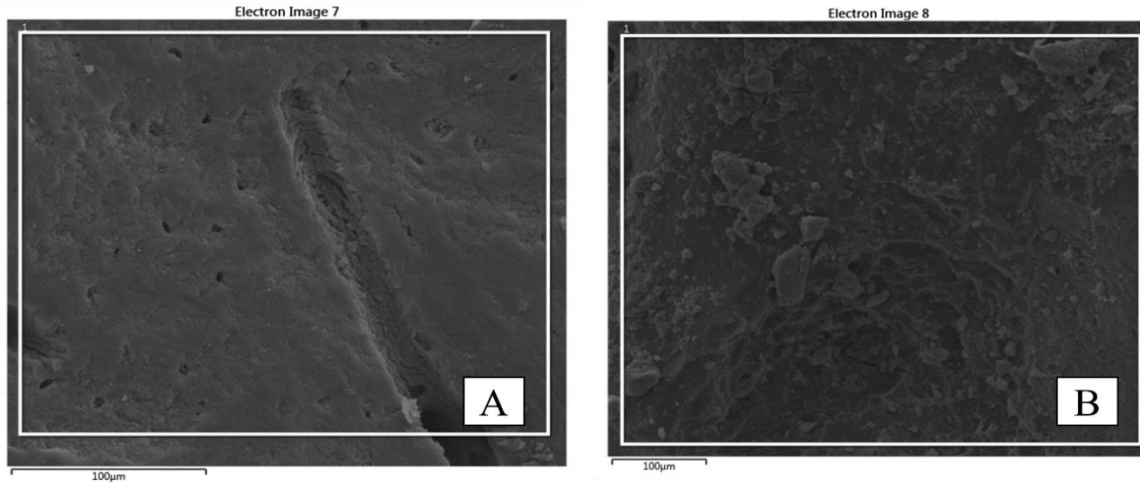
Figura 5.41. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de alumina ativada do fundo do filtro (EDS4).



Fonte: própria do autor.

As amostras de carvão de osso, EDS5 e EDS6 foram analisadas a partir das nas fotomicrografias apresentadas na Figura 5.42, em um aumento de 1000 x.

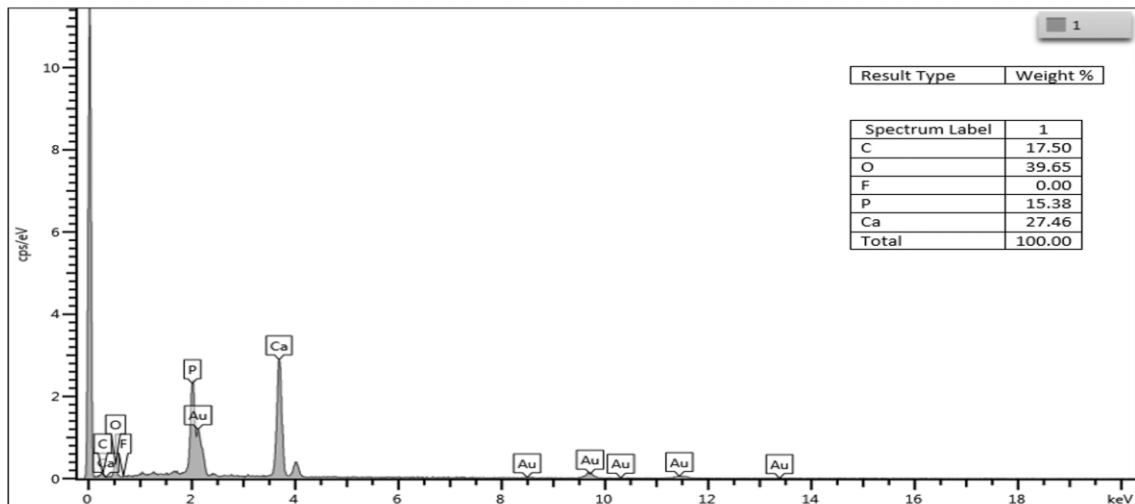
Figura 5.42. Locais de amostragem para ensaios EDS: a) carvão de osso limpo (EDS5) e b) carvão de osso do fundo do filtro (EDS6).



Fonte: própria do autor.

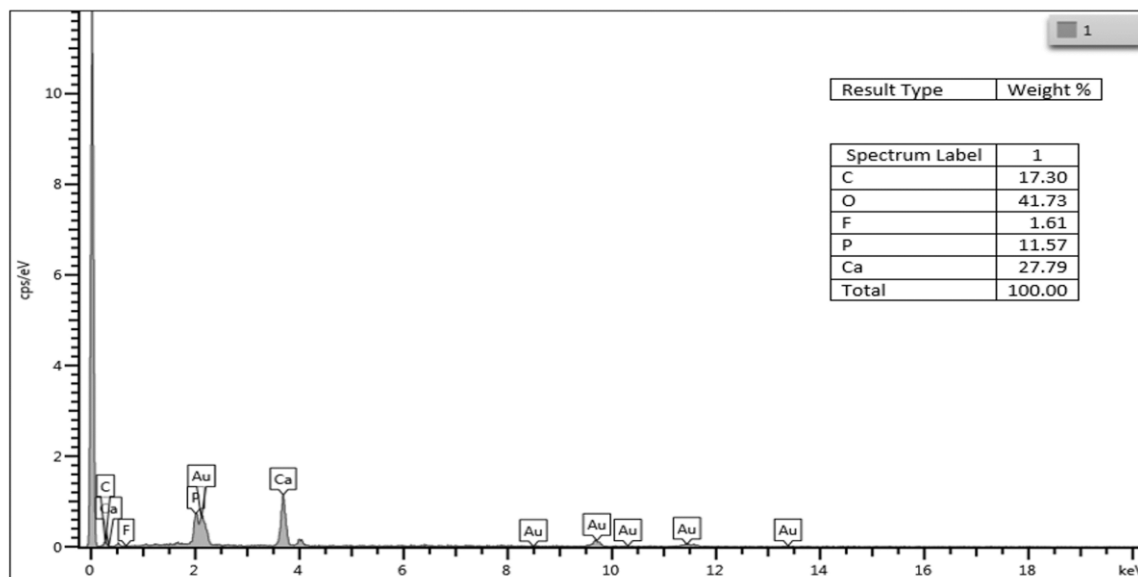
A Figura 5.43 apresenta os picos de energia da amostra de carvão limpo, com contribuições de carbono (17,5%), oxigênio (39,7%), fósforo (15,4%) e cálcio (27,5%). Observa-se, na Figura 5.44, a presença de flúor (1,6%) na amostra de carvão do fundo do filtro (EDS6), indicando a adsorção deste elemento no adsorvente. Os demais elementos, carbono, oxigênio, fósforo e cálcio continuaram a aparecer no EDS2.

Figura 5.43. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de carvão ativado limpo (EDS5).



Fonte: própria do autor.

Figura 5.44. Picos de energia dos elementos presentes na amostra de carvão de osso do fundo do filtro (EDS6).



Fonte: própria do autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sequência com filtro biosand seguido pelos filtros de carvão de osso ou alumina ativada tiveram eficiências de remoção de coliformes totais e *Escherichia coli* acima de 99,99%. Com relação à turbidez, o filtro de alumina ativada apresentou reduções maiores que 96%, superior ao de carvão de osso (>85%). O oposto ocorreu para fluoretos, > 96% e >70%, respectivamente, nos filtros carvão de osso e alumina ativada.

A concentração usada nos ensaios desta pesquisa, 20 mg F/L, foi mais alta do que aquelas usualmente encontradas no ambiente. Neste caso, somente o carvão de osso conseguiu reduzir as concentrações de fluoreto a valores menores que 1,5 mg F/L, atendendo a legislação brasileira. Destaca-se que, embora não seja seu objetivo, o filtro biosand removeu 16,3% da concentração de fluoreto.

Os valores altos de pH na água efluente do filtro de alumina ativada e do filtro de carvão de osso foram inesperados, sendo que os fabricantes não puderam oferecer uma explicação. É provável que tenha havido perda de íons hidroxila dos adsorventes ao meio líquido. Esse aumento de pH foi confirmado em testes usando outro tipo de água. Portanto, o aumento de pH não esteve relacionado as características da água afluenta ao tratamento.

As remoções médias de turbidez nos filtros biosand, alumina ativada e carvão de osso foram, respectivamente, 96,4%, 96,3% e 85,1%. Os valores de turbidez permaneceram abaixo ou próximas de 1,0 UNT na maior parte do tempo de operação do experimento. Entretanto, o filtro de carvão de osso, a partir do dia 45 de operação apresentou turbidez que variou entre 1 e 10 UNT. De alguma forma o filtro de carvão piorou a turbidez em relação ao filtro biosand. A razão para isto não pode ser determinada.

As fotomicrografias da microscopia eletrônica de varredura, em aumentos de 1000x e 2000x, permitiram observar o crescimento do biofilme após 13 semanas de operação contínua, na superfície da camada de areia filtrante no filtro biosand e no interior do filtro de alumina ativada e do filtro de carvão de osso, especificamente na parte inferior do filtro, próximo das crepinas instaladas.

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa mostrou o potencial de utilização de tecnologias já disponíveis para ajudar na produção de uma água para consumo humano com menor risco microbiológico e com potencial para reduzir concentrações de fluoreto abaixo do valor exigido pela Portaria GM/MS No 888/2021, que estabelece o padrão de potabilidade da água no Brasil. Os sistemas de tratamento no ponto de uso são uma alternativa viável para aplicação em áreas rurais e em áreas não servidas por redes de abastecimento de água.

O filtro biosand mostrou resultados favoráveis para aplicação como tratamento de água para consumo humano no ponto de uso, obtendo altas eficiências em termos de remoção de turbidez, *Escherichia coli* e coliformes totais, com valores médios de remoção de, respectivamente, 96,4%, 97,9% e 96,6%. Desta forma, foram atingidos os valores estabelecidos na legislação vigente no Brasil.

A alumina ativada e o carvão de osso, utilizados como materiais adsorventes para redução da concentração de flúor da água, foram capazes de remover, respectivamente, 70,3% e 96,7%, sendo 20 mg F/L a concentração inicial da água do estudo.

O conjunto formado por filtros biosand e alumina ativada ou carvão de osso, pode remover 99,99% de coliformes totais e 100% de *Escherichia coli* presentes na água afluyente. Estes resultados indicam o potencial da água tratada em apresentar baixo risco microbiológico para ser utilizada em consumo humano.

7 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se investigar a causa pontual do aumento substancial de pH, de 7,5 para 10-12, especificamente após filtração com os materiais adsorventes, alumina ativada e carvão de osso.

Recomenda-se estudar a causa do aumento de turbidez no efluente do filtro de carvão de osso, que ocorreu a partir do dia 45 do experimento. A turbidez chegou a alcançar 10 UNT, quando era menor que 1,0. De alguma forma, partículas finas do carvão ou partículas do biofilme começaram a se desprender do filtro.

Recomenda-se investigar as características de operação que possam aumentar a remoção de fluoretos por alumina ativada, que ficou cerca de 10% abaixo da redução no filtro de carvão de osso.

Recomenda-se realizar o processo de lavagem do carvão de osso antes da implementação no sistema, com água deionizada abundante até obter valores de condutividade estáveis e não elevados, no começo da operação. Realizar aproximadamente entre 10 – 15 lavagens por cada 3 kg de carvão de osso.

Recomenda-se estimar a capacidade de adsorção da alumina ativada e carvão de osso.

8 BIBLIOGRAFIA

AIKEN, BENJAMIN A; STAUBER, CHRISTINE E; ORTIZ, GLORIA M; SOBSEY, MARK D. An assessment of continued use and health impact of the concrete biosand filter in Bonao, Dominican Republic. **The American Society of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 85, p. 309 - 317, 2011.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017.

BHATNAGAR, AMIT A; KUMAR, EVA A; SILLANPÄÄ, MIKA. Fluoride removal from water by adsorption - A review. **Chemical Engineering Journal**. v. 171, p. 811 - 840, 2011.

BISHOP, PAUL L; SANSOUCY, GEORGE. Fluoride removal from drinking water by fluidized activated alumina adsorption. **American Water Works Association**. v. 70, p. 554 - 559, 1978.

BONECHAR. **Bonechar Carvão de Osso**. Disponível em: <<https://www.bonechar.com.br>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**: Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, ed. 85, sec. 1, p. 127, 2021.

BROWN, JOE; PROUM, S; SOBSEY, M. D. Sustained use of a household-scale water filtration device in rural Cambodia. **Journal of Water and Health**, v. 7, p. 404 - 412, 2009.

BSF - British Fluoridation Society. **Technical and scientific aspects of water fluoridation**. One in a Million: the facts about water fluoridation. Oldham, England, 2012

CAIRNCROSS, S.; FEACHEM, R. **Environmental health engineering in the tropics: an introductory text**. 2 ed. Chichester: Wiley, 1993.

CAWST - Center of Affordable Water and Sanitation Technology. **Biosand filter manual desing, construction, installation, operation and maintenance**. Calgary, Alberta, Canada: Creative Commons, 2012.

CEVS. Centro Estadual de Vigilância em Saúde. **Sistema de Vigilância do Teor de Fluoreto na Água Para Consumo Humano no Estado Do Rio Grande Do Sul (vigifluór)**, 2016. Disponível em: < <https://cevs.rs.gov.br/upload/arquivos/201705/10122236-vigiagua-relatorio-anual-fluor-2015.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2020.

CLASEN, THOMAS; PARRA, GLORIA G; BOISSON, SOPHIE; COLLIN, SIMON. Household-based ceramic water filters for the prevention of diarrhea: a randomized, controlled trial of a pilot program in Colombia. **The American Society of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 73, p. 790 - 795, 2005.

CONROY, RONÁN M; MEEGAN MICHAEL EMLORE; JOYCE TINA; MCGUIGAN KEVIN; BARNES JOSEPH. Solar disinfection of water reduces diarrhoeal disease: an update. **Archives of Disease in Childhood**, v.81, p. 337 - 338, 1999.

CONSEA - Conselho de segurança alimentar e nutricional do Rio Grande do Sul. **Direito Humano à Água**, 2014. Disponível em: <<http://www4.planalto.gov.br/consea/comunicacao/artigos/2014/direito-humano-a-agua>> Acesso em: 9 dez. 2020.

COSTA, ADILSON B; LOBO, EDUARDO A; KIRST, ALCIDO; SOARES, JOCELENE; GOETTEMES, CARLOS H. Estudo comparativo da concentração de flúor, pH e condutividade elétrica da água subterrânea dos Municípios de Santa Cruz do Sul, Venâncio Aires e Vera Cruz, RS, Brasil. Florianópolis: **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2004.

COSTA, ADILSON B; SOARES, JOCELENE; LOBO, EDUARDO A; KIRST ALCIDO; KUNTATH, IGOR G; CORD, DEISE D. Avaliação da qualidade da água tratada por sistemas de filtração utilizando carvão ativado de osso. **Unopar Científica Ciências Exatas e Tecnológicas**, v.7, p. 5 - 12, 2008.

COSTA, ADILSON B; LOBO, EDUARDO A; SOARES, JOCELENE; KIRST, ALCIDO. Desfluoretação de águas subterrâneas utilizando filtros de carvão ativado de osso. **Águas Subterrâneas**, v. 27, p. 60 - 70, 2013.

COSTA, ADILSON B; SANTOS, RONALDO B; RODRIGUES, GISELE S; KIRST ALCIDO; LOBO, EDUARDO A. **Manual para remoção do excesso de flúor em águas naturais**. Brasil. Ministério da Saúde, v. 1, p. 1 - 34, 2018. Disponível em: <www.funasa.gov.br/>. Acesso em: 9 jan. 2022.

COUTO, HELENA I. **Efeitos do Flúor na Saúde Humana**. Universidade Fernando Pessoa. Faculdade do Ciências da Saúde. Porto, 2018.

CVJETANOVIC, BRANKO. Health effects and impact of water supply and sanitation. **World Health Statistics Quarterly**, v. 39, p. 105 - 117, 1986.

DEBIASI, R; BENETTI, A. D. A methodology to assess vulnerability in small communities drinking water systems. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, p.e 44, 2019.

DGS – Direcção geral da saúde. **Texto de Apoio ao Programa Nacional de Promoção da Saúde Oral. Fluoretos.** Programa Nacional de Promoção da Saúde Oral, 2005.

DIONEX. **ICS-3000 Ion Chromatography System Operator's Manual.** 4 Edition. Sunnyvale/EUA: Dionex Corporation, 2008.

FAWELL, J; BAILEY, K; CHILTON, J; DAHI, E; FEWTRELL, L; MAGARA, Y. **Fluoride in Drinking-water.** London: World Health Organization (WHO), 2006.

FEENSTRA, L; VASAK, L; GRIFFIOEN, J. **Fluoride in groundwater: Overview and evaluation of removal methods.** Utrecht: International Groundwater Resources Assessment Centre, 2007.

FIEBELKORN, AMY P; PERSON, BOBBIE B; QUICK, ROBERT E; VINDIGNI, STEPHEN M; JHUNG, MICHAEL F; BOWEN, ANNA C; RILEY, PATRICIA L. Systematic review of behavior change research on point-of-use water treatment interventions in countries categorized as low- to medium-development on the human development index. **Social Science & Medicine**, v.75, p 622 - 633, 2012.

FUNASA. Fundação nacional de saúde. **Manual de Saneamento.** 3 ed. rev. Brasília: Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, p. 1 - 408, 2004. Disponível em :< https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_saneamento_3ed_rev_p1.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2021.

FUNASA. Fundação nacional de saúde. **Impactos na Saúde e no Sistema Único de Saúde Decorrentes de Agravos Relacionados a um Saneamento Ambiental Inadequado.** 1 ed. Brasília: Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, p. 1 - 248, 2010. Disponível em :< <https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/593/Impactos%20na%20Saude%20e%20no%20sistema%20unico%20de%20saude.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 9 mai. 2021.

FUNASA. Fundação nacional de saúde . **Manual de Fluoretação da Água para Consumo Humano.** 1 ed. Brasília: Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, p.1 - 73, 2012. Disponível em :< http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/mnl_fluoretacao_2.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2021.

FUNASA. Fundação nacional de saúde . **Programa Sustentar. Saneamento e Sustentabilidade em Áreas Rurais.** 1 ed. Brasília: Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, p. 1 - 24, 2018. Disponível em :< http://www.funasa.gov.br/documents/20182/21862/sustentar_publicacao/915644d2-fb28-409c-a7ca-c3cff0e59e98>. Acesso em: 9 mai. 2021.

FUNASA. Fundação nacional de saúde . **9º Caderno de Pesquisa em Engenharia de Saúde Pública**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2018. Disponível em :< https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/583/9%c2%ba_Caderno_pesquisa_Engenharia_Saude_Publica.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 9 mai. 2021.

FUNASA. Fundação nacional de saúde . **Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR)**. 1 ed. Brasília: Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, p. 1 - 2, 2019. Disponível em :< http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/MNL_PNSR_2019.pdf/08d94216-fb09-468e-ac98-afb4ed0483eb>. Acesso em: 9 mai. 2021.

HABUDA-STANIĆ, MIRNA; RAVANČIĆ, MAJA E; FLANAGAN, ANDREW. Review on adsorption of fluoride from aqueous solution. **Materials**, v. 7, p. 6317 - 6366, 2014.

HEALY, M,G; RODGERS, M; BURKE, P. Quantification of biofilm build-up in filters when intermittently loaded with low-strength synthetic wastewater. **Desalination**, v. 271, p. 105 - 110, 2011.

HELLER, L. Relação entre saúde e saneamento na perspectiva do desenvolvimento. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 3, p. 73 - 84, 1998.

IDEXX. **Colilert**. Obtido de Colilert: Disponível em: <https://www.idexx.com.br/pt-br/water/water-products-services/colilert/>. Acesso em 31 mar. 2021.

JENKINSA, MARION W; TIWARIB, SANGAM K; DARBYA, JEANNIE. Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling. **Water Research**, v. 45, p. 6227 – 6239, 2011.

KARUNANITHI, MARGANDAN; AGARWAL, RACHNA; QANUNGO, KUSHAL. A Review of fluoride removal from groundwater. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering**, v. 63, p. 425 - 437, 2019.

LENNTech. **Chemical Properties of Fluorine - Health Effects of Fluorine - Environmental Effects of Fluorine**. Disponível em: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/f.htm> Acesso em: 23 jul. 2020.

LOO, SIEW-LENG; FANE, ANTHONY G; KRANTZ, WILLIAM B; LIM, TEIK-THYE; Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria. **Water Research**, v. 46, p. 3125 - 3151, 2012.

LUBY, STEPHEN P; AGBOATWALLA, MUBINA; HOEKSTRA, ROBERT M; RAHBAR, MOHAMMAD H; BILLHIMER, WARD; KESWICK, BRUCE H. Delayed

effectiveness of home-based interventions in reducing childhood diarrhea, Karachi, Pakistan. **The American Society of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 71, p. 420 - 427, 2004.

MANZ, D. The story of the biosand water filter. Safe water for the world. Calgary, Canadá: **My World Conference 11 - Sustainability**, 2019.

METROHM. **Eco IC 2.925.0020 Manual**. Herisau/Suíça: Metrohm AG, 2021.

MURRAY, J. J. **Appropriate Use of Fluorides for Human Health**. Geneva: World Health Organization, 1986.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Resolução 64/292, de 28 de julho de 2010**: O direito humano à água e ao saneamento, 2010. Disponível em: <https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S> Acesso em 9 dez. 2020.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Uma em cada três pessoas em todo o mundo não tem acesso a água potável. 2019**. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/06/1676671>>. Acesso em: 07 abril. 2021.

PAIVA, ROBERTA F; SOUZA MARCELA, F. Monitoramento da qualidade da água tratada por sistema de desfluoretação de águas subterrâneas do campus da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), cidade de Santa Cruz do Sul, RS, Brasil. **Jovens Pesquisadores**, v.7, p. 18 - 29, 2018.

PAPPIS, CRISTIANE; BAUMANN, LUIZA; RODRIGUES, GISELE S; MAURER, NATALIA B; SANTOS, RONALDO B; LOBO, EDUARDO A; COSTA, ADILSON B. Monitoramento da qualidade da água tratada por sistema de desfluoretação de águas subterrâneas do campus da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), cidade de Santa Cruz do Sul, RS, Brasil. **Jovens Pesquisadores**, v.7, p. 18 - 29, 2017.

PETER-VARBANET, MARYNA; ZURBÜGGA, CHRIS; SWARTZB, CHRIS; PRONK, WOUTER. Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. **Water Research**, v. 42, p. 245 - 265, 2009.

RELLER, MEGAN E; MENDOZA, CARLOS E; LOPEZ, BEATRIZ M; ALVAREZ, MARICRUZ; HOEKSTRA, ROBERT M; OLSON, CHRISTY A; BAIER, KATHLEEN G; KESWICK, BRUCE H; LUBY, STEPHEN. A randomized controlled trial of household-based flocculant-disinfectant drinking water treatment for diarrhea prevention in rural Guatemala. **The American Society of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 69, p. 411 - 419, 2003.

RIO GRANDE DO SUL. Portaria No. 10/99 - **Define Teores de Concentração do Íon Fluoreto nas Águas para Consumo Humano Fornecidas por Sistemas Públicos de Abastecimento**". Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria Estadual da Saúde, 1999.

SHINZATO, MIRIAM C; EZAKI, SIBELE; SARAIVA, ÍSIS C; GIRARDI, GABRIELA B. Métodos de remoção de íons fluoreto em água. **Revista do Instituto Geológico**, v.39, p. 71 - 89, 2018.

SOBSEY, MARK D. **Managing Water in the Home: Accelerated Health Gains from Improved Water Supply**. World Health Organization. Geneva, Suíça. 2002. Disponível em:<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/67319/WHO_SDE_WSH_02.07.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 9 dez. 2020.

STAUBER, C.E; ELLIOT, M.A; KOKSAL, F; ORTIZ, G.M; DIGIANO F.A; SOBSEY, MARK. Characterization of the biosand filter for E. coli reductions from household drinking water under controlled laboratory and field use conditions. **Water Science & Technology**, v. 54, p. 1 - 7, 2006.

TOMAR, VAISHALI; DINESH, KUMAR. A critical study on efficiency of different materials for fluoride removal from aqueous media. **Chemistry Central Journal**, v. 7, p. 1 - 15, 2013.

WAUGH, D. **Public Health Investigation of Epidemiological data on Disease and Mortality in Ireland related to Water Fluoridation and Fluoride Exposure**. Ireland: The Government of Ireland; The European Commission and World Health Organisation, 2013. Disponível em:<<https://hamilton.govt.nz/our-council/consultation-and-public-notice/haveyoursay/Fluoride%20Submissions/59.pdf>> Acesso em 9 dez. 2020.

WHITFORD, GARY M. **Determinants and Mechanisms of Enamel Fluorosis**. Ciba Foundation Symposium, 1997.

WHO - World Health Organization. **Fluorine and Fluorides, Environmental Health Criteria 36**. Geneva: World Health Organization, 1984.

WHO - World Health Organization. **Guidelines for Drinking-water Quality**. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Geneva: World Health Organization, 1996.

WHO - World Health Organization. **Environmental Health Criteria**. Geneva: United Nations Environmental Programme, International Labour Organization, World Health Organization, 2002.

WHO - World Health Organization. **Guidelines for Drinking-water Quality**: fourth edition incorporating first addendum. World Health Organization. Geneva, Suíça. 2017.

9 ANEXO

9.1 Materiais usados para construção dos filtros

Na Tabela 9.1 estão discriminados todos os materiais necessários para a construção, implementação e desenvolvimento do projeto, considerando que o sistema foi construído em duplicada e cada sistema instalado continha um BSF, um AAF e um BCF.

Tabela 9.1. Materiais e ferramentas usadas para instalação dos dois sistemas paralelos de filtros biosand (BSF) e de carvão ativado de osso (BCF) e de alumina ativada (AAF).

Materiais e ferramentas	
Descrição	Quantidade
Luvras de borracha	1 unidade
Furadeira	1 unidade
Jogo de brocas	1 unidade
Peneira 12,5mm ($\pm 1/2''$)	1 unidade
Peneira 6,35mm ($\pm 1/4''$)	1 unidade
Peneira 0,7mm ($\pm 0,03''$)	1 unidade
Pá de construção	1 unidade
Jogo serra copo	1 unidade
Martelo	1 unidade
Chave inglesa	1 unidade
Barra niveladora	1 unidade
Nível	1 unidade
Fita métrica	1 unidade
Baldes grandes (aprox. 5 Litros)	3 unidades
Cronômetro	1 unidade
Garrafa transparente 500 ml	3 unidades

Difusor	3 unidades
Tampa do difusor	3 unidades
Areia regular grossa (areia de filtração < 0,7 mm)	10 sacos de 20 kg
Brita 00 (cascalho de separação 0,7 - 6 mm)	1 saco de 20 kg
Brita 01 (cascalho de drenagem 6 - 12 mm)	1 saco de 20 kg
Tubo esgoto 200 mm	2 metros
Cap esgoto 200 mm	2 unidades
Tubo pvc soldável 25 mm	10 metros
Tubo esgoto 100 mm	4 metros
Cap esgoto 100 mm	8 unidades
Cap pvc 25 mm	6 unidades
Joelho pvc 90x25 mm	12 unidades
Joelho pvc 45x25mm	4 unidades
Te pvc 25 mm	4 unidades
Adesivo pvc 75gr	2 unidades
Crepinas Pluvitec ¾"	6 unidades
Lixa massa 120	3 unidades
Serra ferro	1 unidade
Adaptador pvc flanges 25 mm	10 unidades
Estopa 200 gr	1 unidade
Luva pvc mista 25x ¾"	4 unidades
Adaptador pvc 25x ¾"	10 unidades
Registro esfera soldável 25mm	12 unidades
Cola silicone para pvc 50g	7 unidades
Fita veda rosca 25m	5 unidades
Carvão de osso (Bonechar - Carvão Ativado do Brasil LTDA)	13 kg
Alumina ativada (Aquapro Purificação de Águas)	18 kg

9.2 Custos envolvidos no experimento

Na Tabela 9.2 estão discriminados os custos envolvidos no desenvolvimento do projeto. Estes custos correspondem aos materiais necessários para a instalação e operação do sistema, assim como aqueles relacionados com a microscopia eletrônica de varredura, análises de coliformes totais e *E. coli*. Outros consumíveis estavam disponíveis no LABSAN.

Tabela 9.2. Custos de construção, operação e monitoramento do sistema de tratamento. (Valores de Dezembro 2021).

Descrição do Material	Unidade	Quantidade	Valor Unitário (Reais)	Valor Total (Reais)
Instalação do sistema completo (BSF+AAF+BCF) em duplicata				
Tubo PVC 200mm	Metros	2	\$ 119,90	\$ 239,80
Cap tubo PVC 200mm	Unidade	2	\$ 59,90	\$ 119,80
Tubo PVC 25mm	Barra	2	\$ 33,90	\$ 67,80
Cap tubo PVC 25mm	Unidade	6	\$ 1,70	\$ 10,20
Tubo PVC 100mm	Barra	1	\$ 129,90	\$ 129,90
Cap tubo PVC 100mm	Unidade	8	\$ 9,90	\$ 79,20
Joelho PVC 90x25mm	Unidade	12	\$ 1,90	\$ 22,80
Joelho PVC 45x25mm	Unidade	4	\$ 2,50	\$ 10,00
Tê PVC 25mm	Unidade	4	\$ 1,90	\$ 7,60
Adesivo para PVC 75g	Unidade	5	\$ 6,90	\$ 34,50
Lixa massa 120	Unidade	3	\$ 1,00	\$ 3,00
Serra ferro	Unidade	1	\$ 7,90	\$ 7,90
Adaptador PVC flanges 25mm	Unidade	10	\$ 12,90	\$ 129,00
Estopa 200g	Unidade	1	\$ 4,90	\$ 4,90
Luva PVC mista 25x 3/4"	Unidade	4	\$ 1,50	\$ 6,00
Filtra veda rosca 10x25mm	Unidade	1	\$ 7,90	\$ 7,90
Luva de borracha	Unidade	1	\$ 5,90	\$ 5,90
Adaptador PVC 25x 3/4"	Unidade	10	\$ 1,90	\$ 19,00
Prato jardim 20cm N3 plástico preto	Unidade	2	\$ 4,50	\$ 9,00
Vaso premium N22 plástico preto	Unidade	2	\$ 9,99	\$ 19,98
Registro esfera soldável 25mm	Unidade	12	\$ 9,90	\$ 118,80
Areia grossa 20kg	Unidade	8	\$ 4,90	\$ 39,20
Brita 00 - 20kg	Unidade	1	\$ 7,50	\$ 7,50
Brita 01 - 20kg	Unidade	1	\$ 7,00	\$ 7,00
Alumina ativada Pacote 18kg - AquaPro	Unidade	1	\$ 808,00	\$ 808,00
Carvão de osso 20x50 mesh - Pacote 13kg	Unidade	1	\$ 331,50	\$ 331,50

Análise de <i>E. coli</i> e coliformes totais				
WP200I Gamma Irrad Colilert 100ml 200PK - Caixa	Unidade	1	\$ 2 018,00	\$ 2 018,00
WQT2K Quanti-Tray 2000 disposable 100/BX - Caixa	Unidade	1	\$ 2 589,40	\$ 2 589,40
Microscopia Eletrônica de Varredura				
Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (9 Stubs)	Por Hora	2	\$ 250,00	\$ 500,00
Metalização (9 Stubs)	Por Stub	1	\$ 50,00	\$ 50,00
			Custo Total	\$ 6493,98

9.3 Resultados análise com ANOVA

Tabela 9.3. Resultados da análise estatística com ANOVA dos parâmetros físicos, químicos e biológicos analisados no estudo, com nível de significância de 0,05 da análise estatística com ANOVA nos parâmetros físicos, químicos e biológicos analisados no estudo.

Alcalinidade (mg CaCO₃/L)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	7,75	0,10	0,14	0,713	3,92
BSF2	7,93	0,37			
AAF1	27,22	3,95	0,75	0,395	4,26
AAF2	27,75	0,93			
BCF1	51,52	14,65	5,13	0,033	4,26
BCF2	48,85	3,31			
AAF	27,49	1,49	1027,56	3,25E-21	4,26
BCF	50,87	5,03			
Condutividade (µS/cm)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	284,92	874,15	0,08	0,78	3,92
BSF2	286,67	1607,13			
AAF1	690,11	6758,19	30,40	1,86E-07	3,92
AAF2	842,57	42946,72			
BCF1	1432,58	1352181,97	0,18	0,67	3,92
BCF2	1517,85	1289219,91			
AAF	756,54	27436,06	23,42	3,68E-06	3,92
BCF	1009,32	1341422,25			
pH					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	7,38	0,35	0,37	0,54	3,92
BSF2	7,44	0,25			
AAF1	11,14	1,01	0,18	0,67	3,92
AAF2	11,07	0,67			
BCF1	10,94	0,44	0,45	0,50	3,92
BCF2	10,86	0,40			
AAF	11,11	0,73	2,45	0,12	3,92
BCF	10,90	0,41			
Temperatura da água (°C)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	18,62	2,88	0,01	0,94	3,92
BSF2	18,65	2,92			
AAF1	18,62	3,08	0,01	0,92	3,92

AAF2	18,66	2,96			
BCF1	18,62	2,97	2,12E-03	0,96	3,92
BCF2	18,63	2,91			
AAF	18,59	3,02	1,67E-03	0,97	3,92
BCF	18,52	2,94			
Carbono Orgânico Total (mg COT/L)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	1,51	0,37	0,34	0,57	4,41
BSF2	1,63	0,09			
AAF1	4,19	2,39	0,31	0,59	4,41
AAF2	3,80	2,69			
BCF1	12,99	57,40	0,03	0,87	4,41
BCF2	13,48	25,32			
AAF	3,60	1,62	25,68	8,03E-05	4,41
BCF	11,20	31,35			
Escherichia Coli (NMP/100 mL)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	50,83	4033,44	0,26	0,61	4,13
BSF2	62,72	5733,62	0,26		
AAF1	0,00	0,00	65535,00	0,00	4,13
AAF2	0,00	0,00	65535,00		
BCF1	0,00	0,00	65535,00	0,00	4,13
BCF2	0,00	0,00	65535,00		
AAF	0,00	0,00	65535,00	0,00	4,13
BCF	0,00	0,00	65535,00		
Coliformes Totais (NMP/100 mL)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	119,61	27392,72	0,02	0,90	4,13
BSF2	126,78	25488,89			
AAF1	1,11	10,46	2,13	0,15	4,13
AAF2	1,10	9,99			
BCF1	1,11	10,46	2,12	0,15	4,13
BCF2	0,99	10,29			
AAF	5,00	2,61	1,09E-14	1,00	4,13
BCF	5,00	2,61			
Fluoreto (mg F/L)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	16,98	15,01	0,14	0,71	3,92
BSF2	17,25	18,95			
AAF1	6,14	4,41	0,29	0,59	3,92
AAF2	5,95	3,94			
BCF1	0,73	0,24	0,06	0,81	3,92
BCF2	0,75	0,23			

AAF	4,85	3,97	438,35	3,68E-43	3,92
BCF	0,84	0,22			
Turbidez (UNT)					
Filtro	Média	Variância	F	Probabilidade	Valor crítico para F
BSF1	0,88	0,04	0,55	0,46	3,92
BSF2	0,91	0,06			
AAF1	0,90	0,06	1,13	0,29	3,92
AAF2	0,95	0,06			
BCF1	3,48	8,93	0,68	0,41	3,92
BCF2	3,96	13,37			
AAF	0,90	0,03	47,71	2,07E-10	3,92
BCF	1,33	10,64			