



**UNIVERSIDADE TECNÓLOGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**  
**MULTICAMPI APUCARANA E LONDRINA**

**DANDLEY VIZIBELLI**

**SISTEMA FIME ASSOCIADO A APLICAÇÃO DO COAGULANTE *Moringa oleifera***  
**E DO SULFATO DE ALUMÍNIO NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE**  
**ABASTECIMENTO**

**LONDRINA**

**2021**

DANDLEY VIZIBELLI

**SISTEMA FiME ASSOCIADO A APLICAÇÃO DO COAGULANTE *Moringa oleifera*  
E DO SULFATO DE ALUMÍNIO NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE  
ABASTECIMENTO**

**FiME SYSTEM ASSOCIATED WITH COAGULANT APPLICATION *Moringa oleifera* AND ALUMINUM SULFATE IN WATER TREATMENT FOR SUPPLY**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental / multicampi Apucarana e Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia Ambiental

Linha de Pesquisa: Saneamento Ambiental

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Edilaine Regina Pereira

LONDRINA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Londrina**



DANDLEY VIZIBELLI

**SISTEMA FIME ASSOCIADO A APLICAÇÃO DO COAGULANTE MORINGA OLEIFERA E DO SULFATO DE ALUMÍNIO NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 17 de Setembro de 2021

Prof.a Edilaine Regina Pereira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Ajadir Fazolo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Ariovaldo Jose Da Silva, Doutorado - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 17/09/2021.

Dedico este trabalho a minha família pelo apoio e sustentação providos a mim durante todos os anos de vida acadêmica e também aos meus amigos e colegas de trabalho pelo suporte e ajuda fornecidos durante esta pesquisa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me conceder forças, saúde e proteção durante todo o período no qual cursei este programa de mestrado, por me iluminar e me abençoar estando ao meu lado nos bons momentos e naqueles em que minha resiliência foi testada pelas adversidades do caminho, e agradeço pelas inúmeras oportunidades que proporciona em minha vida.

Agradeço a minha família por todo suporte, sacrifício, investimento, conselhos e incentivos, em especial minha mãe Perla que em nenhum momento deixou de acreditar em mim sempre me apoiando, minha avó Edivir pelo companheirismo e suporte incondicional e minha irmã Isabella pelo apoio e por me animar nos momentos de tensão, não posso me esquecer dos meus tios e tias, primos e primas que também desempenharam papel importante neste desafio.

A toda a equipe de funcionários e professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina agradeço pelo trabalho, suporte, pela estrutura disponibilizada, pelo conhecimento passado, e pelas experiências compartilhadas. Em especial agradeço a minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edilaine Regina Pereira por mais esta oportunidade de trabalho e parceria, pela confiança depositada em mim, agradeço também pelo suporte que me forneceu me defendendo nos momentos que precisei.

Gostaria de agradecer ao Laboratório multiusuário do Campus Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelas análises realizadas, em especial aos técnicos Rodolfo Zanin e Talita Kato.

Agradeço aos meus companheiros de engenharia ambiental e de laboratório que me auxiliaram nas tarefas práticas desenvolvidas neste trabalho, a Higor e Mariana, e em especial a Fellipe pela amizade e ajuda desde a graduação e mais dois anos de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos.”*

(Albert Einstein, 1879-1955)

VIZIBELLI, D. **Sistema FiME associado a aplicação do coagulante *Moringa oleifera* e do Sulfato de alumínio no tratamento de água de abastecimento**. 2021. 102 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021.

## RESUMO

Como resultado do crescimento exponencial da população humana nos últimos anos observou-se uma maior deterioração de mananciais e corpos hídricos utilizados para abastecimento, fator este que prejudica em especial populações residentes em locais afastados dos grandes centros urbanos que possuem maior dificuldade no acesso a água tratada. Em vista disto este estudo possui como objetivo encontrar maior empregabilidade para a técnica de Filtração de Múltiplas Etapas (FiME), permitindo que águas com maiores concentrações de partículas possam ser tratadas, através do emprego da etapa de coagulação ao sistema, comparando o não uso de coagulantes (C1) e o uso de coagulantes como o Sulfato de alumínio (C2) e a semente de *Moringa oleifera* (C3) nas concentrações de  $6\text{mg.L}^{-1}$  e  $80\text{mg.L}^{-1}$ , respectivamente, em carreiras de filtração realizadas em um sistema FiME abastecido com água sintética. Tal sistema foi constituído pelas etapas de Pré-filtro dinâmico(PFD), Pré-filtro de pedregulho(PFA) e Filtros lentos, estes diferenciados entre si pela composição da camada suporte composta por não-tecido geotêxtil (FL1) ou material granular (FL2). Os parâmetros observados durante os experimentos foram temperatura, pH, condutividade elétrica, cor aparente, turbidez, sólidos totais, suspensos totais e dissolvidos totais além da perda de carga nos filtros lentos. Dentre estes a temperatura e o pH não apresentaram grandes variações, onde o segundo permaneceu dentro dos limites previstos por legislação; a condutividade elétrica demonstrou alterações apenas em C3. Os dados de cor aparente, turbidez e sólidos demonstraram que a aplicação de coagulantes foi eficiente de modo a reduzir a carga de sólidos na entrada dos filtros lentos. As diferentes configurações da camada suporte dos filtros lentos não proporcionou diferença significativa entre os valores de eficiência registrados nos parâmetros cor aparente, turbidez e sólidos. Os dados de eficiência de remoção e cor aparente proporcionados pelos tratamentos não apresentaram diferença significativa entre si, com valores finais permanecendo entre 6,0 e 9,0uH. Os dados de eficiência de remoção de turbidez demonstram que o tratamento C3 apresentou estatisticamente os melhores resultados registrando valores finais de  $1,65\pm 0,46$  e  $1,39\pm 0,47\text{uT}$ , seguidos pelos dados de C2 com  $3,07\pm 0,87$  e  $2,87\pm 0,73\text{uT}$ , e C1 com  $5,17\pm 0,77$  e  $5,08\pm 0,45\text{uT}$ , FL1 e FL2 respectivamente. Quando observado o parâmetro perda de carga a menor duração do tratamento ocorreu em C3, onde a perda de carga máxima foi alcançada em 15(FL1) e 17(FL2) dias, C1 atingiu a perda de carga máxima em 18(FL1) e 19(FL2) dias. Durante os 21 dias de tratamentos propostos C2 não atingiu o valor máximo de perda de carga de 15cm, registrando valores finais de 3,4(FL1) e 3,8(FL2) cm. Os resultados comprovaram que a adição de coagulantes contribuiu para a amortização de picos de turbidez e aumento da faixa de turbidez onde os filtros podem ser empregados. Para o emprego do coagulante extraído da semente da *Moringa oleifera*, onde observou-se melhores resultados de eficiência de remoção de turbidez, ainda é necessário o avanço na redução da carga de sólidos adicionada ao sistema através de sua solução coagulante, de modo a permitir maior duração da carreira de filtração.

**Palavras-chave:** Filtração em Múltiplas Etapas; *Moringa oleifera*; Sulfato de alumínio; Não-tecido geotêxtil.

VIZIBELLI, Dandley. **FiME system associated with coagulant application *Moringa oleifera* and Aluminum sulfate in water treatment for supply**. 2021. 102 pg. Dissertation (Master in Environmental Engineering) – Federal University of Technology – Paraná, Londrina, 2021.

## ABSTRACT

As a result of the exponential growth of the human population in recent years, there has been a greater increase in the deterioration of water sources and bodies of water used for supply, a factor that especially harms populations residents in places further away from large urban centers, and have greater difficulty in accessing treated water. In this view, this study aims to find greater employability for the Multi-Step Filtration (FiME) technique, allowing water with higher concentrations of particles to be treated through the use of the coagulation step in the system, comparing the non-use of coagulants (C1) and the use of coagulants such as Aluminum sulphate (C2) and *Moringa oleifera* seed (C3) at concentrations of  $6\text{mg.L}^{-1}$  and  $80\text{mg.L}^{-1}$ , respectively, in filtration rows carried out in a FiME system supplied with synthetic water. This system was constituted by the stages of dynamic pre-filter (PFD), gravel pre-filter (PFA) and slow filters, these differentiated from each other by the composition of the support layer composed of geotextile non-woven (FL1) or granular material (FL2). The parameters observed during the experiments were temperature, pH, electrical conductivity, apparent color, turbidity, total solids, total suspended and total dissolved, in addition to head loss in the slow filters. Among these, the temperature and pH did not show great variations, where the second remained within the limits established by legislation; electrical conductivity showed changes only in C3. The apparent color, turbidity and solids data demonstrated that the application of coagulants was efficient in order to reduce the solids load at the entrance of the slow filters. The difference support layer configurations between the slow filters did not provide a significant difference between the efficiency values registered in the parameters relative color, turbidity and solids. The apparent color removal efficiency data provided by the treatments showed no significant difference between them, with final values remaining between 6.0 and 9.0uH. The turbidity removal efficiency data demonstrate that the C3 treatment statistically presented the best results, registering final values of  $1.65\pm 0.46$  and  $1.39\pm 0.47\text{uT}$ , followed by the C2 data with  $3.07\pm 0.87$  and  $2.87\pm 0.73\text{uT}$  and C1 with  $5.17\pm 0.77$  and  $5.08\pm 0.45\text{uT}$ , FL1 and FL2 respectively. When the pressure loss parameter was observed, the shortest treatment duration occurred in C3, where the maximum load loss was reached in 15(FL1) and 17(FL2) days, C1 reached the maximum load loss in 18(FL1) and 19 (FL2) days. During the 21 days of proposed treatments, C2 did not reach the maximum pressure loss value of 15cm, recording final values of 3.4(FL1) and 3.8(FL2) cm. The results proved that the addition of coagulants contributed to the amortization of turbidity peaks and an increase in the turbidity range where filters can be used. For the use of the coagulant extracted from the seed of *Moringa oleifera*, where better results of turbidity removal efficiency were observed, it is still necessary to advance in the reduction of the solids load added to the system through its coagulant solution, in order to allow greater length of the filtration run.

**Keywords:** Multi-Step Filtration; *Moringa oleifera*; Aluminum sulfate; Non-woven geotextiles.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Sementes, com casca e sem casca, de <i>Moringa oleifera</i> .....	37
<b>Figura 2</b> – Fluxograma das etapas de trabalho .....	38
<b>Figura 3</b> – Esquema das etapas do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas (FiME) .....	39
<b>Figura 4</b> – Sistema de filtração em múltiplas etapas .....	39
<b>Figura 5</b> – Esquema em corte vertical do Pré-filtro Dinâmico (PFD).....	41
<b>Figura 6</b> – Esquema em corte vertical do Pré-filtro de Pedregulho (PFA).....	43
<b>Figura 7</b> – Esquema em corte vertical dos filtros lentos FL1 e FL2.....	44
<b>Figura 8</b> – Ponto de aplicação do coagulante na segunda e terceira carreira de filtração.....	50
<b>Figura 9</b> – Pontos de monitoramento do sistema .....	52
<b>Figura 10</b> – Curvas granulométricas das faixas de areia e pedregulho.....	55
<b>Figura 11</b> – Variação da turbidez em função do volume de solução original.....	57
<b>Figura 12</b> – Variação da turbidez e pH em função da concentração de aplicação da solução coagulante de Sulfato de alumínio. ....	59
<b>Figura 13</b> – Variação da turbidez em função do volume de solução coagulante <i>Moringa oleifera</i> .....	60
<b>Figura 14</b> – Valores médios de pH coletados ao longo das carreiras de filtração. ....	64
<b>Figura 15</b> – Valores médios da cor aparente coletados ao longo das três carreiras de filtração.....	66
<b>Figura 16</b> – Valores de turbidez coletados ao longo da primeira carreira de filtração.....	71
<b>Figura 17</b> – Representação em boxplot dos valores de turbidez coletados nas etapas do sistema durante a primeira carreira de filtração.....	72
<b>Figura 18</b> – Valores de turbidez coletados ao longo da segunda carreira de filtração.....	73
<b>Figura 19</b> – Representação em boxplot dos valores de turbidez coletados nas etapas do sistema durante a segunda carreira de filtração.....	74
<b>Figura 20</b> – Valores de turbidez coletados ao longo da terceira carreira de filtração.....	75
<b>Figura 21</b> – Representação em boxplot dos valores de turbidez coletados nas	

etapas do sistema durante a terceira carreira de filtração.....	76
<b>Figura 22</b> – Valores médios de sólidos registrados ao longo das três carreiras de filtração.....	83
<b>Figura 23</b> – Perda de carga nos filtros lentos durante as carreiras de filtração .....	87

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Tratamentos resultados das carreiras de filtração. ....	49
<b>Tabela 2</b> – Parâmetros, metodologia, equipamento e frequência de monitoramento adotados nas análises das amostras.....	53
<b>Tabela 3</b> – Parâmetros de distribuição granulométrica do material utilizado neste experimento.....	56
<b>Tabela 4</b> – Caracterização da água sintética de abastecimento.....	58
<b>Tabela 5</b> – Médias de temperatura e condutividade elétrica durante as carreiras de filtração.....	61
<b>Tabela 6</b> – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro condutividade elétrica .....	63
<b>Tabela 7</b> – Médias de pH durante as três carreiras de filtração.....	64
<b>Tabela 8</b> – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro pH. ....	65
<b>Tabela 9</b> – Médias de cor aparente (uH) durante as carreiras de filtração. ....	67
<b>Tabela 10</b> – Eficiência de remoção de cor aparente (%) durante as carreiras de filtração. ....	68
<b>Tabela 11</b> – Eficiência de remoção de cor aparente (%) acumulativa durante as carreiras de filtração.....	69
<b>Tabela 12</b> – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro cor aparente no PFA. ....	70
<b>Tabela 13</b> – Média de turbidez (uT) durante as etapas de tratamento das carreiras de filtração.....	77
<b>Tabela 14</b> – Eficiência de remoção de turbidez (%) durante as carreiras de filtração. ....	77
<b>Tabela 15</b> – Eficiência de remoção de turbidez (%) acumulativa durante as carreiras de filtração.....	79
<b>Tabela 16</b> – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez no PFD.....	80
<b>Tabela 17</b> – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez no PFA.....	81

<b>Tabela 18</b> – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez nos FLs .....	81
<b>Tabela 19</b> – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez nos tratamentos completos .....	82
<b>Tabela 20</b> – Médias de sólidos registradas durante as carreiras de filtração. ....	84
<b>Tabela 21</b> – Médias de eficiência de remoção de sólidos registradas durante as carreiras de filtração.....	85
<b>Tabela 22</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro condutividade elétrica durante a primeira carreira de filtração. ....	96
<b>Tabela 23</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro condutividade elétrica durante a segunda carreira de filtração. ....	96
<b>Tabela 24</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro condutividade elétrica durante a terceira carreira de filtração. ....	96
<b>Tabela 25</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro pH durante a primeira carreira de filtração.....	97
<b>Tabela 26</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro pH durante a segunda carreira de filtração.....	97
<b>Tabela 27</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro pH durante a terceira carreira de filtração.....	97
<b>Tabela 28</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro cor aparente na etapa PFD. ....	97
<b>Tabela 29</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro cor aparente na etapa PFA. ....	98
<b>Tabela 30</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro cor aparente na etapa de FLs. ....	98
<b>Tabela 31</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez na etapa de PFD. ....	98
<b>Tabela 32</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez na etapa PFA .....	98
<b>Tabela 33</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez na etapa de FLs .....	99

<b>Tabela 34</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez no tratamento completo.....	99
<b>Tabela 35</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro sólidos totais durante os tratamentos completos. ....	99
<b>Tabela 36</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro sólidos dissolvidos totais durante os tratamentos completos. ....	99
<b>Tabela 37</b> – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro sólidos suspensos totais durante os tratamentos completos.....	100

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Faixas de granulometria .....	46
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
APHA	American Public Health Association
CAWST	Centre of Affordable Water and Sanitation Technology
C1	1° Carreira de Filtração
C2	2° Carreira de Filtração
C3	3° Carreira de Filtração
CU	Coefficiente de Uniformidade
D <sub>10</sub>	Diâmetro de grão correspondente aos 10% mais finos na curva granulométrica.
D <sub>60</sub>	Diâmetro de grão correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica.
FiME	Filtração em Múltiplas Etapas
FL	Filtro Lento
FL1	Filtro Lento 1
FL2	Filtro Lento 2
G1	Granulometria 1
G2	Granulometria 2
G3	Granulometria 3
G4	Granulometria 4
G5	Granulometria 5
G6	Granulometria 6
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LD	Londrina
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PFA	Pré-filtro de pedregulho
PFD	Pré-filtro dinâmico
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PVC	Policloreto de Vinila
T1	Tratamento 1
T2	Tratamento 2
uH	Unidades Hazen
uT	Unidades de Turbidez
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.1.1 Objetivo geral .....	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
2.1 QUALIDADE E IMPORTÂNCIA DAS ÁGUAS.....	21
2.2 ABASTECIMENTO DE PEQUENAS POPULAÇÕES .....	22
2.3 TRATAMENTO DE ÁGUA.....	22
2.4 FILTRAÇÃO .....	23
2.5 FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS.....	26
2.5.1 Pré filtro dinâmico.....	27
2.5.2 Pré filtro de pedregulho .....	28
2.5.3 Filtro lento.....	29
2.5.4 Areia e não tecido geotêxtil como meios filtrantes .....	30
2.6 COAGULAÇÃO .....	31
2.6.1 Coagulação aplicada a filtração em múltiplas etapas.....	33
2.7 FLOCULAÇÃO .....	35
2.8 SEDIMENTAÇÃO.....	36
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
3.1 FASE 1: CARACTERÍSTICAS E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA FIME .....	39
3.1.1 Aspectos construtivos do sistema FiME .....	39
3.1.2 Pré-filtro dinâmico .....	40
3.1.3 Pré-filtro de pedregulho.....	42
3.1.4 Filtros lentos .....	43
3.1.5 Reservatórios de água para abastecimento do sistema.....	45
3.1.6 Preparação dos materiais utilizados na composição dos leitos dos filtros .....	45
3.2 FASE 2: PREPARAÇÃO, OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DAS FASES EXPERIMENTAIS .....	47
3.2.1 Produção da água utilizada para o abastecimento do sistema FiME .....	47
3.2.2 Operação do sistema e segregação das etapas experimentais.....	48
3.2.2.1 Sulfato de alumínio .....	51
3.2.2.2 <i>Moringa oleifera</i> .....	51



3.2.3 Pontos de monitoramento e parâmetros analisados .....	51
3.3 FASE 3: ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COLETADOS .....	53
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	55
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SINTÉTICA.....	57
4.3 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE APLICAÇÃO DOS COAGULANTES .....	58
4.3.1 Sulfato de alumínio.....	58
4.3.2 Moringa oleifera.....	60
4.4 TEMPERATURA E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	61
4.5 PH .....	63
4.6 COR APARENTE .....	66
4.7 TURBIDEZ .....	70
4.8 SÓLIDOS TOTAIS, SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS E SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS .....	83
4.9 PERDA DE CARGA .....	86
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>89</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	90
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE 1 – TÍTULO DO APÊNDICE .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O papel fundamental da água para a sobrevivência e desenvolvimento das comunidades, correlacionado ao fato da constante expansão da população humana, produz uma demanda crescente deste recurso. Tal demanda se agrava visto que a qualidade dos recursos hídricos vem se deteriorando por resultado da poluição decorrente de ação antrópica, fruto de descarte e despejo de resíduos e também da utilização excessiva de adubos, fertilizantes, agrotóxicos e inseticidas (MEDEIROS, LIMA e GUIMARÃES 2016).

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) publicou por meio do Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto dados referentes ao ano de 2019, ilustrando a situação do atendimento urbano por rede de água onde seis unidades da federação apresentaram índices médios abaixo e 80%, com destaque para o Estado do Amapá com índice que permaneceu abaixo dos 40% (BRASIL, 2020).

Outros dados apresentados pelos indicadores institucionais do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (VigiaÁgua), também referentes ao ano de 2019, através do Sistema de Informações de Vigilância da Qualidade de Água para Consumo Humano (SisÁgua) apresentaram cobertura de abastecimento de água no Brasil de 78,9% por Sistema de Abastecimento de Água (SAA), 2,7% por Solução Alternativa Coletiva (SAC), e 0,53% por Solução Alternativa Individual (SAI). Deste modo, 17,9% dos municípios cadastrados no sistema não constatarem informações suficientes ou não possuíam tratamentos que se enquadrassem nas categorias de SAA, SAC e SAI (BRASIL, 2020).

Estes dados identificam a existência de uma parcela da população suscetível ao consumo de água sem tratamento, de baixa qualidade ou até mesmo potencialmente contaminada por fontes poluidoras uma vez que não possuem abastecimento através da rede geral de distribuição de água, e não possuem dados quantitativos e qualitativos de controle registrados e monitorados através dos sistemas de vigilância VigiaÁgua e SisÁgua.

Para combater esta realidade, há uma necessidade em buscar adaptações e inovações de maneira a estabelecer tecnologias que possam oferecer alternativas

de modo a garantir ou adequar o abastecimento de água no Brasil mantendo os níveis de qualidade exigidos pela legislação.

Medeiros et al. (2020) citam como fator protagonista a empregabilidade da filtração em múltiplas etapas (FiME) em pequenas comunidades devido a características como sua alta eficiência na remoção de partículas e fácil operação e manutenção. Trata-se de um conjunto de filtros com diferentes granulometrias de areia e pedregulho que atuam de maneira física e biológica proporcionando a retenção de impurezas presentes na água.

Porém, para que o conjunto de filtros que compõe uma FiME atinja níveis de eficiência aceitáveis, a água a ser tratada deve respeitar um limite de carga de impurezas representado principalmente pelo parâmetro turbidez. Este limite dificulta o emprego desse sistema em corpos de água que não o respeitem, principalmente em épocas de precipitações intensas causando aumento repentino na carga de diversas substâncias presentes na água (DI BERNARDO et al., 1999).

Alternativa que vem sendo investigada e proposta de modo a auxiliar o tratamento da água pelo sistema FiME é a adição de agentes coagulantes como forma complementar ao sistema, optando-se por tentativas cada vez mais fundamentadas no uso dos coagulantes orgânicos como materiais complementares pelo seu apelo sustentável e de baixo custo, e a substituição do material granular por outros materiais como, por exemplo, camadas suporte de manta não tecido geotêxtil agulhado que podem contribuir de modo a economizar espaço e volume de material mantendo ou até melhorando os níveis de eficiência de remoção de impurezas.

Assim, de modo a encontrar a maior empregabilidade para a técnica de filtração de múltiplas etapas, permitindo que águas com ainda maiores concentrações de partículas possam ser tratadas, este trabalho visa empregar a etapa de coagulação ao sistema, e associar diferentes materiais na composição dos leitos filtrantes de um sistema de filtração FiME.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Construção e instalação de uma estação piloto reduzida de tratamento de água associando a filtração de múltiplas etapas à adição do coagulante orgânico extraído da semente de *Moringa oleifera* e do coagulante inorgânico Sulfato de alumínio.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a viabilidade do emprego do sistema FiME adicionando a este sistema, como uma das etapas, o processo de coagulação por meio da aplicação do coagulante orgânico extraído da semente de *Moringa oleifera* e do coagulante inorgânico Sulfato de alumínio no processo de tratamento de água;
- Realizar o acompanhamento dos parâmetros físico/químicos temperatura, condutividade elétrica, pH, cor aparente, turbidez, sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais, observados durante os tratamentos da água pelo sistema FiME;
- Avaliar a aplicação de materiais alternativos como o não tecido geotêxtil sintético na composição da camada suporte dos leitos filtrantes dos FLs;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 QUALIDADE E IMPORTÂNCIA DAS ÁGUAS

A água é um recurso natural essencial para todos os aspectos da vida humana e sua importância se dá não só como componente primordial da vida, mas abrange também, valores culturais, religiosos e principalmente valores econômicos associados ao desenvolvimento agrícola e industrial (MAURYA, SINGH e KUMAR, 2020).

Trata-se de um composto químico formado por três átomos, dois de hidrogênio e um de oxigênio (H<sub>2</sub>O), no entanto sua composição ainda recebe uma quantidade de sais minerais, matéria orgânica, e até mesmo formas de vida características da região onde se encontra. Esta grande quantidade de constituintes gera vasta variabilidade na sua composição e características que podem, ou não, prejudicar o seu uso para as diversas atividades das quais dela necessitam (BITTENCOURT e PAULA, 2014).

Quando há alterações bruscas das características naturais de determinado recurso hídrico diz-se que este sofre ou sofreu processo de poluição. A poluição pode ser consequência de eventos naturais como a erosão, mas na grande maioria dos casos a poluição é causa de ações antrópicas que impactam direta ou indiretamente o recurso hídrico (FERREIRA FILHO, 2017).

Essas alterações das características da água podem torná-la imprópria para o uso, seja por abastecimento urbano, abastecimento industrial, irrigação, consumo animal, ou outros, assim como podem ser prejudiciais no aspecto ambiental causando desequilíbrio nas interações em várias escalas do ecossistema (BRASIL, 2013).

De maneira a garantir a preservação e a disponibilidade dos recursos hídricos, e determinar seus usos e características a serem respeitadas, criou-se no Brasil uma série de dispositivos legais formando um conjunto de legislação que trata sobre este assunto. Dentre estes mecanismos estão os Padrões de Potabilidade para Consumo Humano, ditado pelo Ministério da Saúde, as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente que define a classificação das

águas, e a Política Nacional de Recursos Hídricos cujos objetivos e diretrizes se fazem cumprir pela Agencia Nacional de Águas (AITH e ROTHBARTH, 2015).

Mesmo com a existência destas legislações, a Constituição Brasileira vigente ainda não apresenta de forma explicita a água como direito humano, mas visto sua importância fundamental para a manutenção da vida, coloca-se sua distribuição como fator de extrema importância na gestão pública. Assim, movido não apenas por caráter econômico, mas também por caráter social de dever das gestões públicas, promove-se no Brasil a ampliação constante do abastecimento de água tratada pela rede pública a 100% da população brasileira.

## 2.2 ABASTECIMENTO DE PEQUENAS POPULAÇÕES

O sistema convencional de tratamento de água adotado no Brasil não se aplica em regiões com pequena população devido principalmente a este ser um sistema projetado para tratar grandes volumes de águas para grandes populações, assim, economicamente não se torna viável sua utilização, além de outros fatores de projeto (ARANTES et al, 2015).

As redes de distribuição também possuem limitação física e muitas vezes não conseguem chegar até o consumidor final que mora afastado de grandes centros e, segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2018 o abastecimento por água tratada pela rede geral de distribuição de água no Brasil registrou índice de 85,8% dos estimados 71 milhões de domicílios brasileiros, o que sugere um montante de pouco mais de 10 milhões de domicílios sem acesso a rede geral de distribuição de água. Observando estes, encontra-se um número de aproximadamente 29 milhões de brasileiros sem acesso a rede geral de distribuição de água.

## 2.3 TRATAMENTO DE ÁGUA

Os recursos hídricos possuem uma composição muito heterogênea quando comparados entre si, os sais minerais, a matéria orgânica, e a biota de microrganismos presentes em cada um possuem frações correspondentes às

características das regiões em que estes recursos hídricos se encontram. Esta heterogeneidade dos recursos hídricos associada as características ideais que a água deve possuir para cada tipo de uso adiciona um nível de complexidade no tratamento necessário para a adequação desta água (MACÊDO, 2007).

Mesmo com grande diversidade na composição dos recursos hídricos, os microrganismos, as partículas orgânicas, e as partículas minerais presentes na água possuem propriedades primarias como dimensão, densidade, solubilidade, volatilidade, polaridade, ponto de ebulição e biodegradabilidade. Baseados nessas propriedades primarias, há uma grande diversidade de tratamentos e tecnologias utilizadas para diversos fins no tratamento de água, porem há alguns processos mais utilizados convencionalmente no tratamento de água para consumo humano como a coagulação, a floculação, a sedimentação, a filtração e a desinfecção (FERREIRA FILHO, 2017).

## 2.4 FILTRAÇÃO

O processo de filtração possui dois ciclos de funcionamento, o primeiro é a fase efetiva de filtração onde há a passagem do líquido por um meio filtrante constituído de material poroso, no qual são retidas partículas com tamanho proporcional aos poros e espaços vazios presentes nesse meio filtrante (BITTENCOURT e PAULA, 2014).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), há dois grupos de mecanismos responsáveis pela retenção das partículas no meio filtrante, os mecanismos de aderência e os mecanismos de transporte.

Os mecanismos de aderência são fenômenos de natureza química responsáveis pela adesão da partícula à superfície do meio filtrante, estes mecanismos são as forças de van der Waals, interações eletrostáticas, adsorções específicas, e interações químicas (LIBÂNIO, 2010).

Os mecanismos de transportes são fenômenos responsáveis pela aproximação das partículas de impurezas presentes na água ao material que compõe o meio filtrante, estes mecanismos são o impacto inercial, a difusão, a sedimentação, a interceptação e a ação hidrodinâmica (HOWE et al., 2016).

Howe, et al. (2016) e Di Bernardo e Dantas (2005) descrevem os mecanismos de transporte da seguinte forma:

- Impacto inercial: partículas de maior tamanho e peso adquirem velocidade alta capaz de manter trajetória divergente as linhas de corrente, assim acabam por se chocar ao meio filtrante e lá permanecem;
- Difusão: choque das moléculas de água com partículas menores, o que resulta em um movimento browniano que transporta as moléculas menores em direção ao meio filtrante;
- Sedimentação: a velocidade de sedimentação da partícula cruza as linhas de corrente da água o que favorece a deposição da partícula na superfície do meio filtrante;
- Interceptação: duas partículas de raio maior que a distância entre as linhas de corrente se chocam, tal choque causa nas partículas um movimento a tangente das linhas de corrente o que pode favorecer a deposição destas partículas na superfície do meio filtrante;
- Ação hidrodinâmica: um conjunto de forças tangenciais favorecem o deslocamento de uma partícula das linhas de corrente, esta partícula segue então as forças tangenciais em direção a superfície do meio filtrante.

A retenção das partículas no meio filtrante também pode ser favorecida por fatores de caráter biológico como a formação de biofilmes, também conhecidos por superfície de coesão ou “schmutzdecke”. Este biofilme característico em filtros com baixas taxas de filtração concentra uma grande atividade biológica que favorece a retenção de minerais e matéria orgânica (FUNASA, 2019).

O segundo ciclo de funcionamento do processo de filtração consiste na retrolavagem onde um fluxo de água na direção contrária ao fluxo normal do filtro é lançado sobre ele agitando o meio filtrante, assim, as partículas retidas, de menor tamanho que o meio filtrante, são retiradas pela extremidade contrária, e após o turbilhonamento do material do meio filtrante, o mesmo volta a formação original onde os materiais vão se organizar de acordo com seu peso e densidade (HOWE, et al., 2016).

A limpeza dos filtros pela retrolavagem se faz necessária em dois casos, o primeiro quando a qualidade da água tratada não esteja atingindo os níveis de potabilidade exigidos por legislação, e o segundo quando a perda de carga,



diferença entre o nível da água sobre o leito filtrante e o nível da estrutura de descarga do filtro, atinja níveis máximos, geralmente projetados entre 0,7 e 1,0 m. Nestes casos encerra-se a carreira de filtração para procedimentos de limpeza das estruturas (VERAS e DI BERNARDO, 2008).

Existem diversas tecnologias de filtração que podem ser classificadas de acordo com diferentes características de projeto, a primeira é quanto a sua estrutura física, um leito filtrante pode ser construído horizontal ou verticalmente, tal estrutura deve prever também a direção do fluxo no qual a água será introduzida no tratamento, fluxo ascendente ou descendente (MACÊDO, 2007).

Há também a classificação de acordo com a taxa de filtração adotada, filtros rápidos possuem taxa de filtração de 80 a 600  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , são amplamente empregados em estações de tratamento de água de superfície e apresentam eficiências altas na remoção de parâmetros físicos e químicos. Filtros lentos por sua vez possuem taxas de filtração de 3 a 6  $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  são filtros onde a água a ser tratada não necessita passar pelo processo de clarificação que envolve coagulação, floculação e sedimentação, filtros lentos possui boas eficiências em remoção de parâmetros físicos e, principalmente, parâmetros microbiológicos da água (LIBÂNIO, 2010).

Os filtros podem ser diferenciados e classificados também de acordo com seu meio filtrante, seja por sua estrutura ou por sua composição. Estruturalmente o filtro é composto pela camada suporte e pelo meio filtrante, a camada suporte pode ser constituída de qualquer material que adicione capacidade de retenção do meio filtrante, seja material granular grosseiro ou até mesmo a manta não tecido geotêxtil sintético, já o meio filtrante pode apresentar camada de material única, dupla camada ou até mesmo tripla camada, alterando granulometrias e materiais (SOUZA, 2007).

Os materiais que compõe um meio filtrante devem apresentar características como porosidade, permeabilidade e grande área de superfície de contato. Estas características popularizaram o uso de materiais granulares como seixos, areias, e carvões, porem há estudos de materiais alternativos que possam participar da composição de um filtro, seja na substituição da camada suporte, como apresenta Ferraz e Paterniani (2002) onde tal camada costumeiramente composta de material granular é substituída pelo não tecido geotêxtil, ou no próprio

meio filtrante como apresenta Batista et al. (2012) em seu estudo que evidencia potencial do uso da borra de café e do carvão ativado produzido a partir dela como material filtrante com eficiência até mesmo na remoção de pesticidas.

Pode-se ainda empregar diferentes tipos de filtros em associação entre si formando mais de um nível de filtração com o objetivo de adicionar eficiência na remoção de diferentes parâmetros, ou etapas protetoras que garantam maior eficiência em níveis de filtração mais finos, um exemplo desta aplicação é filtração em múltiplas etapas, onde adiciona-se etapas de pré filtração de modo a proteger o filtro lento de águas com altas cargas de turbidez e microrganismos (MEDEIROS, et al., 2020).

## 2.5 FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS

A Filtração em Múltiplas Etapas constitui-se de um conjunto de filtros com diferentes meios filtrantes responsáveis pela remoção das partículas sólidas e microrganismos da água, de maneira gradual, portanto, cada etapa remove uma fração de impurezas de modo a não sobrecarregar a etapa de filtração posterior, evitando assim curtos intervalos entre a saturação dos filtros, e garantindo uma boa eficiência de remoção de partículas para águas com maiores faixas de turbidez, cor, sólidos e microrganismos (FUNASA, 2019).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992), por meio da NBR-12216, que define as normas técnicas para projetos de estações de tratamento de água para abastecimento público, determina quais tipos de tratamentos devem ser utilizados para cada classificação específica de água, assim, um aspecto determinante quando se trata de tecnologias de tratamento de água é a presença ou não do processo de clarificação por coagulação química.

Esta mesma norma limita o uso da filtração em múltiplas etapas a águas do tipo B devido a este sistema não possuir etapa de coagulação química em seu tratamento, assim pode-se alimentar o sistema apenas com águas subterrâneas ou superficiais cuja origem se dá em bacias não protegidas, e que apresentem as seguintes características: DBO 5 dias média de 1,5 a 2,5 mg.l<sup>-1</sup>; DBO 5 dias máxima de 3 a 4 mg.l<sup>-1</sup>; coliformes média de 5000 a 20000 NMP/100ml; coliformes máximo

>20000 NMP/100ml em menos de 5% das amostras; pH de 5 a 9; cloretos de 250 a 600; fluoretos >3.

Uma estação de filtração em múltiplas etapas consiste na associação em série de pré filtro dinâmico, pré filtro de pedregulho e filtro lento, de maneira que esta associação tenha como objetivo condicionar a água para que a mesma adquira as características ideais para a passagem pelo filtro posterior, atribuindo ao último filtro a finalidade de polimento da água para que esta atinja os padrões de potabilidade exigidos por legislação através da Portaria GM/MS nº 888 (SÁNCHEZ, 2012 e BRASIL, 2021).

### 2.5.1 Pré filtro dinâmico

O início de uma estação de filtração em múltiplas etapas consiste na aplicação do pré filtro dinâmico que possui o objetivo principal de garantir a segurança do sistema, impedindo a passagem de águas com picos extremos de turbidez, resultado principalmente de épocas de intensa precipitação no manancial de captação. O pré filtro dinâmico também é responsável pela remoção de sólidos grosseiros e parte dos organismos presente na água (MUSHILA et al., 2016).

Segundo Di Bernardo et al. (1999) sua estrutura consiste em uma unidade de filtração cujo leito é composto por camadas de material granular com diferentes tamanhos, dispostas de modo que o material de menor granulometria fique na superfície e o material de maior granulometria fique na base, adiciona-se também mecanismos de drenagem na base da estrutura para coleta da água pré filtrada. Tal disposição permite que, durante a captação, em picos de presença de sólidos suspensos, a superfície do pré filtro dinâmico, por possuir granulometria menor, seja rapidamente obstruída, preservando assim as etapas posteriores de tratamento.

A primeira camada filtrante de material granular fino presente no pré filtro dinâmico apresenta grande área superficial que proporciona atuação principal do mecanismo de transporte de sedimentação, assim este filtro também proporciona remoção de material fino seja sólidos ou microrganismos (FUNASA, 2019).

Veras e Di Bernardo (2008), em seu estudo sobre tratamento de água por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas, apresentaram valores de

eficiência de remoção máxima para o pré filtro dinâmico de cerca de 35% para o parâmetro turbidez, 29% para cor aparente, 66% para sólidos suspensos totais, 67% para coliformes totais e 41% quanto ao parâmetro coliformes fecais.

Franco, Silva e Paterniani (2012) também registraram valores de eficiência de remoção de turbidez e cor aparente próximos a 30% em um estudo sobre o tratamento de água por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas durante a fase de pré filtração dinâmica.

### 2.5.2 Pré filtro de pedregulho

O emprego do uso do pré filtro de pedregulho consiste na adoção de uma etapa de filtração intermediária com o objetivo de preparar a água para o processo de filtração lenta retirando uma boa parte de sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, e microrganismos que a etapa de pré filtração dinâmica não conseguiu reter (SÁNCHEZ, 2012).

Para Di Bernardo et al. (1999) tais filtros podem possuir diferentes configurações, dependendo da direção do fluxo da água (descendente ou ascendente), ou da configuração de seu leito filtrante (em camadas ou em série).

A filtração em camadas ocorre em um filtro de corpo único separado por camadas de material granular de diferentes granulometrias e de tamanho decrescente acompanhando a direção do fluxo de água a ser filtrada. Trata-se de uma única unidade de filtração o que permite a instalação em uma área menor e menores custos de implementação (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

A filtração em série, por sua vez, ocorre em diferentes câmaras de filtração onde os meios de diferentes granulometrias são separados, assim a água a ser filtrada deve percorrer cada câmara de uma vez. Este processo possui maior cuidado sanitário uma vez que permite maiores remoções de microrganismos patogênicos por apresentar um maior número de unidades de filtração, representando assim múltiplas barreiras de remoção e proteção (VERAS e DI BERNARDO, 2008).

### 2.5.3 Filtro lento

A filtração lenta é a última etapa do sistema de filtração de múltiplas etapas, é um processo de filtração mais refinado que as etapas anteriores, onde o meio filtrante possui uma permeabilidade muito menor, permitindo assim a retenção de partículas coloidais (MAURYA, SINGH e KUMAR, 2020).

A filtração lenta trata-se de um processo não apenas físico, esta etapa apresenta também interações biológicas que aumentam a eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e microrganismos. Tal atividade biológica é possível pois o material de granulometria fina que constitui o meio filtrante no processo de filtração lenta proporciona a retenção de partículas em sua superfície e este material retido forma lentamente um biofilme conhecido como superfície de coesão ou “schmutzdecke” (CHAN et al., 2018).

Os processos mais importantes durante a filtração lenta são decorrentes da camada biológica presente nele, a atividade biológica nesta camada é decorrente da presença de partículas minerais, matéria orgânica, e uma grande diversidade de microrganismos que envolve bactérias, algas e protozoários. A concentração desses microrganismos e de toda essa atividade biológica na superfície do filtro lento permite maiores valores de remoção de parâmetros microbiológicos da água (NI' MATUZAHROH et al., 2020).

Este biofilme não se forma instantaneamente no filtro lento, depende do acúmulo de partículas minerais, matéria orgânica e microrganismos na superfície do filtro e o tempo para a formação do biofilme no filtro lento depende das características da água a ser tratada. Assim uma vez instalado o filtro há a necessidade de uma fase de amadurecimento até que o biofilme se forme proporcionando ao filtro lento atingir valores máximos de remoção (DI BERNARDO et al., 1999).

O filtro lento se torna muito sensível a altas cargas de partículas presentes na água, por isso a necessidade de emprego da pré filtração, não se recomendando águas cuja turbidez extrapole 10uT por mais de dois dias, por exemplo. Tais picos podem sobrecarregar os filtros necessitando, portanto, de menores intervalos entre limpeza e manutenção. A alta eficiência na remoção de microrganismos também não deve ser fato utilizado para propor a ausência de um processo de desinfecção

final. A desinfecção é imprescindível para garantir que qualquer microrganismo que porventura se mantenha presente no meio líquido possa ser inativado (FUNASA, 2019).

#### 2.5.4 Areia e não tecido geotêxtil como meios filtrantes

Para que um material possa ser utilizado como meio filtrante este deve apresentar algumas características fundamentais, a primeira é a baixa ou nenhuma reatividade com a água uma vez que não se deve haver adição de propriedades enquanto esta atravessa o meio filtrante. O material ainda deve apresentar baixa permeabilidade através de pequenos espaços vazios de modo a reter as partículas e microrganismos presentes na água, porosidade para retenção e deposição das partículas que se deseja remover, e elevada área superficial de modo a manter sua funcionalidade por um período de tempo sustentável (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Visto isso, a areia se estabeleceu como principal material utilizado como constituinte de meios filtrantes, e por meio do controle de algumas características como tamanho dos grãos, tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade, o uso da areia se estendeu a diversos tipos de filtros, desde os mais rudimentares aos mais finos níveis de filtração.

Di Bernardo et al. (1999) citam os estudos granulométricos desenvolvidos ao longo do tempo e as propriedades estabelecidas como ótimas que a areia deve apresentar, por exemplo, em meios filtrantes de filtros lentos, tamanho dos grãos entre 0,08 e 1,0 mm, tamanho efetivo entre 0,15 e 0,30 mm e coeficiente de desuniformidade, menor que 5.

Outro material que vem encontrando espaço no uso de técnicas de filtração é a manta não tecido geotêxtil, ou manta geotêxtil. Seu principal emprego tem sido na superfície dos meios filtrantes de modo a reter parte das impurezas aumentando assim a duração das carreiras de filtração e diminuindo a espessura da camada de areia, porém pode-se empregar também na substituição da camada suporte e até na substituição total do leito filtrante de areia.

Medeiros et al. (2020) em sua estação de filtração por múltiplas etapas para escala residencial aplicou o uso de não tecido geotêxtil gramatura 2000g.m<sup>-2</sup> como

camada superficial no filtro lento e no pré filtro dinâmico identificando que esta barreira física adicional foi responsável por potencializar a remoção de parâmetros físicos e principalmente microbiológicos como *E.coli*, cistos de Giardia e oocistos de *Cryptosporidium*.

Ferraz e Paterniani (2002) em seu estudo sobre a redução da espessura da camada suporte através da substituição por mantas não tecidas na filtração lenta de águas de abastecimento apresentam o emprego de um não tecido geotêxtil de gramatura de 1464 g.m<sup>-2</sup> substituindo com sucesso a camada suporte tradicionalmente composta de pedregulhos, proporcionando baixa perda de carga no sistema, reduzindo custos de implementação e mantendo a eficiência de remoção de impurezas.

Franco, Silva e Paterniani (2012) aplicaram uma camada superficial de manta não tecido geotêxtil aos filtros lentos em seu sistema de filtração de múltiplas etapas alterando diferentes configurações entre mantas com gramatura de 150 e 400 g.m<sup>-2</sup>. Estes autores usaram o não tecido geotêxtil também como substituição da camada suporte dos filtros de areia. Este filtro associado com outras técnicas foi responsável pelo aumento de eficiência de 90 para 99% de remoção de turbidez e de 89 para 98% de remoção de cor aparente, além de contribuir para prolongar a duração das carreiras de filtração.

Santos e Paterniani (2014) vão além e propõem a substituição completa de um filtro lento de areia por um filtro lento de meio filtrante composto apenas por manta não tecido geotêxtil. A gramatura utilizada foi de 500 g.m<sup>-2</sup>, e na comparação com um filtro lento convencional (leito de areia), os autores determinaram um leito de não tecido geotêxtil com espessura de dois terços para manter os níveis de eficiência de remoção de todos parâmetros físicos e microbiológicos.

## 2.6 COAGULAÇÃO

Presente nas águas, há uma série de partículas orgânicas e inorgânicas características de cada região resultantes de processos erosivos que adicionam às águas turbidez, cor, toxicidade, além de trazerem consigo agentes patógenos e infecciosos. Tais partículas são classificadas como coloidais devido ao seu pequeno tamanho (menores que 1µm), característica esta que dificulta sua

remoção do meio líquido por processos de separação física como a filtração (BITTENCOURT e PAULA, 2014).

Estas partículas presentes nas águas superficiais possuem capacidade de interação natural com as moléculas de H<sub>2</sub>O, esta característica divide essas partículas em dois grupos, as hidrofóbicas, que possuem maior dificuldade em interações com as moléculas de H<sub>2</sub>O, e as hidrofílicas, que atraem interações com as moléculas de H<sub>2</sub>O com maior facilidade (KOTZ et al., 2016).

Com o tempo todas estas partículas coloidais tendem a se agregar, no caso das hidrofóbicas, por serem termodinamicamente instáveis, e no caso das hidrofílicas, por possuírem carga de superfície. No entanto, esperar esta agregação natural não é viável devido ao longo tempo necessário para elas se desenvolverem (BETTELHEIM et al., 2016).

O agente coagulante possui então o objetivo de acelerar a desestabilização destas moléculas, processo que pode ocorrer por diferentes mecanismos sendo eles: a compressão da dupla camada elétrica, a adsorção e neutralização de cargas, a adsorção e formação de pontes interarticular e a varredura (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Santos et al. (2007) destacam a importância de dois destes mecanismos para os processos mais comumente utilizados no tratamento de água, a adsorção e neutralização de cargas, e a varredura.

Na adsorção e neutralização de cargas a hidrólise dos coagulantes gera, de maneira imediata, íons positivos que são adsorvidos pelas superfícies das partículas coloidais gerando neutralização de cargas o que favorece a adesão dessas partículas no meio filtrante, portanto, não necessita da formação de flocos grandes. Um fator importante a ser observado é que por apresentar maior simplicidade nos mecanismos para ocorrer a adsorção e neutralização de cargas necessita-se de uma menor quantidade de coagulantes (SANTOS, 2007).

O segundo mecanismo destacado, a varredura, dentre todos os mecanismos, é o que possui maior utilização em estações de tratamento de água que adotam os processos convencionais de coagulação, floculação, sedimentação e filtração, isto devido aos flocos gerados apresentarem maior tamanho, peso e densidade o que favorece sua deposição no leito dos decantadores. O coagulante adicionado ao meio em doses suficientes, mais elevadas que em outros processos,



gera nucleação do precipitado na superfície das partículas criando assim o crescimento de um precipitado amorfo, tal precipitado amorfo possui maior capacidade de agregar partículas em sua estrutura formando então flocos de maior tamanho (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

### 2.6.1 Coagulação aplicada a filtração em múltiplas etapas

Como já mencionado a filtração em múltiplas etapas é uma tecnologia de tratamento de água extremamente promissora e com um alto grau de confiabilidade em se tratando no seu uso e emprego em pequenas comunidades. Seu sistema simples porém eficiente, e menos custoso quando comparado a outras técnicas de tratamento durante implementação e manutenção, além de aspectos construtivos facilitam o seu emprego nestas situações (FUNASA, 2019).

Fica difícil porém propor um tratamento ideal que possa ser empregado por todas as pequenas comunidades pois estas costumam estar espalhadas em regiões de difícil acesso com características de relevo, vegetação e climas próprias, ainda mais em um país com dimensões continentais como o Brasil. Ainda há o fator características naturais da água que, como já citado, variam de acordo com as características particulares da região onde ela se encontra (ARANTES et al, 2015; SANCHEZ et al., 2012).

De maneira a aumentar a adaptabilidade do sistema às diferentes características do local de implantação e melhorar sua capacidade de tratamento como por exemplo a ampliação da faixa de turbidez recomendada para tratamento pelo sistema algumas pesquisas vem explorando o uso de processos como a coagulação e a floculação associadas ao sistema FIME.

Richter e Moreira (1981) afirmam um tempo de floculação em pré-filtros de pedregulho de 3 a 5 minutos, valores bem reduzidos quando comparados a 15 minutos exigidos em condições laboratoriais para Jar-test, por exemplo. Cinara (1996) em seu estudo combinando pré-filtros de pedregulho a filtros rápidos, apresentou valores de redução do uso de coagulantes de cerca de 30% quando comparado a sistemas de tratamento convencionais.

Sánchez (2012) observou eficiências de remoção de turbidez, após a aplicação o coagulante Sulfato de alumínio somado a passagem pelo pré-filtro de

pedregulho, entre 85 e 98% valores maiores quando comparados a não aplicação do coagulante onde registrou remoção próxima a 46%.

Franco (2010) por sua vez, em seu sistema FIME encontrou valores de remoção de turbidez e cor aparente de 62 e 55%, respectivamente, quando empregado o uso do coagulante a base de *Moringa oleifera* esta eficiência saltou para valores em torno de 85% para os dois parâmetros.

Tais pesquisas levantam a possibilidade de aplicação da etapa de coagulação a sistemas FiME com sucesso na melhoria de eficiência na remoção de turbidez e cor aparente, garantindo maior segurança para a etapa de filtração lenta, e permitindo que as carreiras de filtração se prolonguem de modo que o processo de saturação dos filtros será retardado.

Outro ponto levantado é que não só coagulantes já consolidados no mercado como o Sulfato de alumínio podem ser empregados a estes sistemas, mas também coagulantes orgânicos como o caso da solução a base de sementes de *Moringa oleifera*, apresentada na FIGURA 1, que apresenta características e vantagens como a não toxicidade, a biodegradabilidade e a geração de menores quantidades de lodo com menores concentrações de metais (OLIVEIRA et al. 2018).

FIGURA 1 – Sementes, com casca e sem casca, de *Moringa oleifera*.



Fonte: Autoria própria (2021).

Algumas outras vantagens conferidas a utilização da *Moringa oleifera* são a possibilidade de produção da cultura no local, visto que a espécie foi introduzida

no Brasil por volta de 1950 e que se adaptou muito bem a regiões com temperatura médias superiores a 25°, e por não requerer ajustes de pH ou causar problemas de corrosão (VERSIANI, 2008; LO MONACO et al. 2010; IOSHIMURA, 2016).

## 2.7 FLOCULAÇÃO

Subsequente ao processo de coagulação ocorre a floculação das partículas que, uma vez desestabilizadas, desenvolvem características que permitem sua agregação formando flocos de maior peso, tamanho e densidade, propriedades que permitem maior facilidade na sua separação da água por processos físicos (FERREIRA FILHO, 2017).

O encontro destas moléculas coloidais desestabilizadas é provocado pela indução de gradientes de velocidade de mistura suaves no meio líquido, onde tal velocidade deve ser cuidadosamente calculada pois se muito alta, pode acabar por provocar o rompimento das ligações entre as partículas, desfazendo assim os flocos formados (MORUZZI et al., 2016).

Na floculação não há remoção de material orgânico ou inorgânico presente na água, sua finalidade é a adequação destas moléculas para que elas possam ser removidas em outros processos. Na unidade de floculação ocorrem duas ações, agregação e ruptura de flocos, ações estas que influem tamanha importância ao tempo e intensidade de agitação aplicados. Se estes parâmetros não forem corretamente dimensionados a ação predominante na unidade de floculação será a ruptura de flocos (LIBÂNIO, 2010).

As unidades floculadoras podem ser hidráulicas ou mecanizadas, a primeira consiste em câmaras com obstáculos onde o fluxo de água não atinge altas velocidades, estes obstáculos propiciam agitação suficiente para que a ação predominante no meio seja a agregação de partículas. A segunda consiste em câmaras onde se emprega o uso de agitadores mecânicos que são programados para garantir agitação suave do meio permitindo também a predominância do processo de agregação de moléculas (HOWE et al., 2016).

Há ainda os chamados floculadores granulares, que são câmaras onde há a disposição de material granular como seixos. Neste processo a água flui entre os espaços vazios causando agitação suave e favorecendo a formação de flocos,

estes floculadores possuem vantagem quando há a necessidade de aplicação deste processo em instalações onde o espaço físico é reduzido (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Vale salientar que a eficiência do processo de floculação está ligada diretamente a eficiência do processo de coagulação assim sendo, se o processo de coagulação não acontecer de forma correta, **os flocos** não se formarão causando efeitos negativos nos tratamentos subsequentes (BITTENCOURT e PAULA, 2014).

## 2.8 SEDIMENTAÇÃO

A sedimentação é um processo de ocorrência natural proporcionado pela ação de forças gravitacionais, trata-se da separação das fases líquida e sólida de um meio, onde a fase líquida com menor densidade entre as moléculas sofre menor ação das forças gravitacionais decantando-se permanecendo então sobre a fase sólida cujas moléculas possuem maior peso e densidade e sofrem maior ação das forças gravitacionais, assim sedimentando-se e permanecendo abaixo da fase líquida. Ligado as etapas de coagulação e floculação, a sedimentação forma o chamado processo de clarificação da água (FERREIRA FILHO, 2017).

Ao processo de sedimentação atribui-se o fato de ser o tratamento mais antigo utilizado pelo homem, devido as águas superficiais possuírem boa quantidade de partículas minerais e orgânicas, tais partículas intensificadas por processos erosivos e agitadas por turbilhonamento dos corpos hídricos, adicionam características como turbidez e cor as águas. As partículas minerais, possuem maior peso e densidade proporcionando que estas sofram sedimentação prontamente pela gravidade uma vez que o turbilhonamento cesse, diminuindo então índices de turbidez e cor, e clarificando a água (MACÊDO, 2007).

Porém, partículas orgânicas possuem menor peso e densidade e exigem um maior tempo para sedimentar-se por ação da gravidade. Assim, o processo de sedimentação reflete diretamente as eficiências proporcionadas pela ação da coagulação e floculação em uma estação de tratamento de água (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

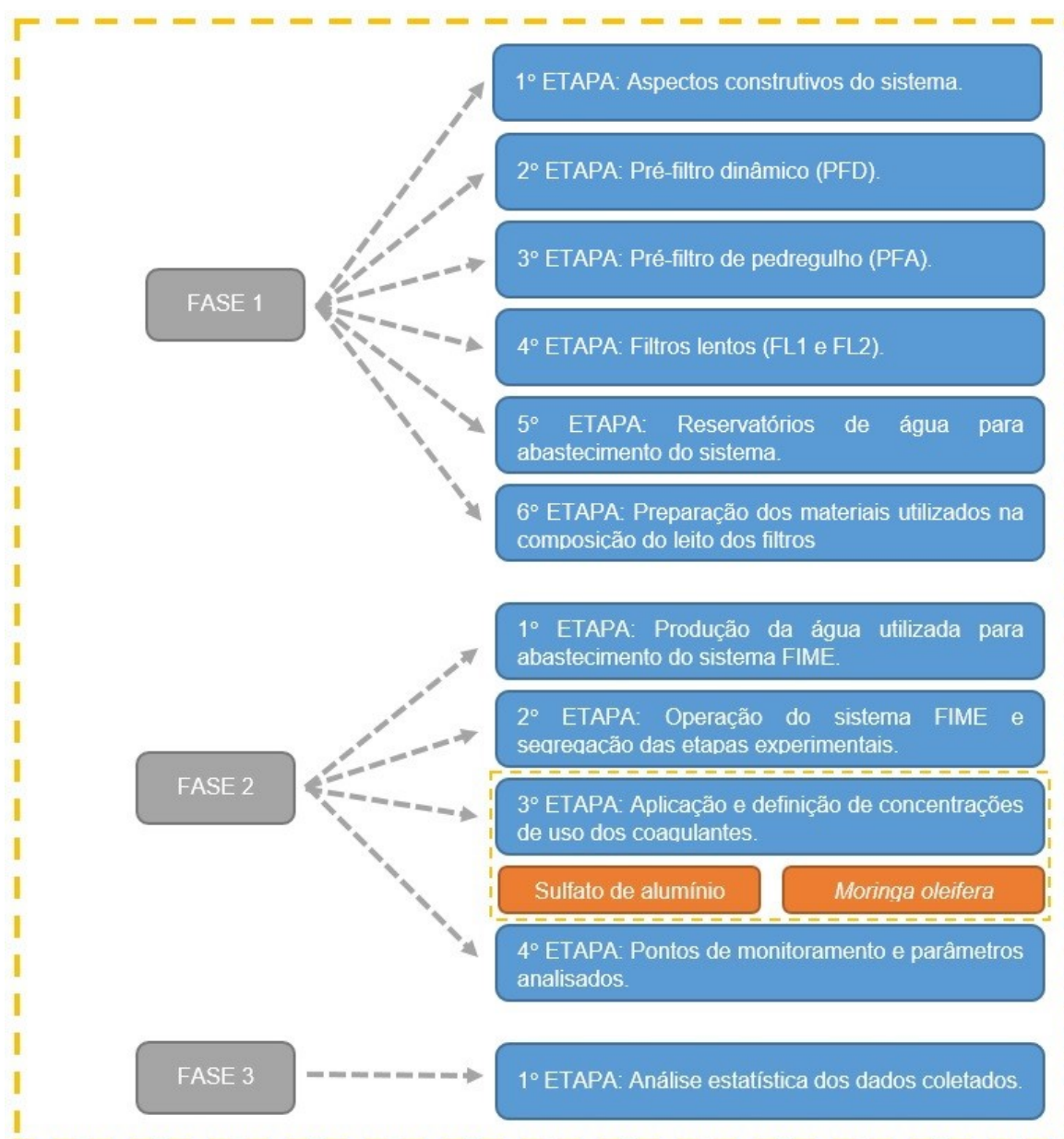
No decantador, câmara onde acontece o processo de sedimentação, a regra é minimizar ao máximo turbilhonamentos e fluxos preferenciais, a água deve

passar em velocidade baixa e se houver presença de obstáculos, estes não devem adicionar movimento intenso ou aumento em velocidade de fluxo, com risco de desfazer o flocos anteriormente formados. Tais flocos serão sedimentados ao fundo do tanque decantador, a água decantada escoará pela superfície onde será encaminhada para tratamento posterior (LIBÂNIO, 2010; BITTENCOURT e PAULA, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização desta pesquisa adotou um planejamento ordenando as etapas de trabalho em três fases, iniciando-se pelas características e construção do sistema FiME, seguido por preparação, operação e monitoramento das fases experimentais, e finalizando no tratamento de dados e análise estatística realizada, como demonstrado na FIGURA 2.

FIGURA 2 – Fluxograma das etapas de trabalho.



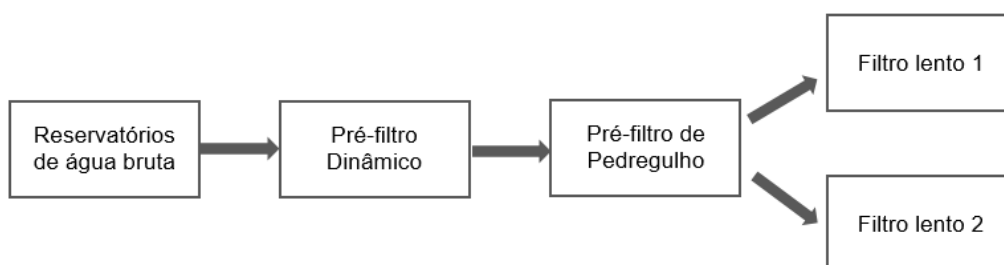
FONTE: Autoria própria (2021).

### 3.1 FASE 1: CARACTERÍSTICAS E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA FiME

#### 3.1.1 Aspectos construtivos do sistema FiME

Optou-se pela construção de um sistema FiME completo, contendo as etapas de pré-filtração dinâmica (PFD), pré-filtração de pedregulho (PFA) e filtração lenta (FL), formando níveis de tratamento subsequentes nesta mesma ordem como demonstra a FIGURA 3.

FIGURA 3 – Esquema das etapas do sistema FiME.



FONTE: Autoria própria (2021).

Ao sistema FiME foi ainda adicionado dois reservatórios para o abastecimento de água, e vários registros posicionados nas entradas e saídas das etapas de filtração como pode-se observar na FIGURA 4.

FIGURA 4 – Sistema de filtração em múltiplas etapas.



FONTE: Autoria própria (2021).

Legenda: PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho ascendente; FL1 – Filtro Lento 1; FL2 – Filtro Lento 2;

A estrutura dos filtros presentes no sistema FiME foi construída utilizando canos de policloreto de vinila (PVC) com 150mm de diâmetro e as alturas dos filtros variou dependendo da composição de seu leito filtrante, altura mínima de lâmina de água, altura para observação da perda de carga e altura até a borda superior.

A base de cada filtro foi construída com um cap de diâmetro 150mm fixado por cola e silicone, nele havia a instalação de uma flange onde podia ser ligado o abastecimento ou escoamento do filtro, e ou um registro de saída para esgotamento do filtro. Na base interna de cada filtro, adicionou-se ainda uma tela para evitar que o meio filtrante escoasse entre as ligações das etapas de filtração, e de maneira a evitar o escoamento preferencial junto a extremidade interna de cada filtro foi aplicado uma camada de areia com granulometria fina nas paredes internas fixada com cola de resistência elevada (DI BERNARDO et al., 2011; ROSA, 2017).

Durante o preenchimento dos leitos dos filtros optou-se pelo uso dos materiais areia, pedregulho e manta não-tecido geotêxtil, sempre evitando ao máximo criar condições para a presença de espaços vazios e fluxos preferenciais, havendo cuidado para a criação de camadas homogêneas e planas, adicionado o material granular em porções não maiores que 400g nos filtros já previamente preenchido com água, e durante a adição de camadas de manta não-tecido geotêxtil tomou-se o cuidado para que as camadas possuíssem diâmetro igual ou superior ao diâmetro interno dos filtros de maneira a minimizar escoamentos preferenciais junto as paredes internas (FREITAS, 2017).

### 3.1.2 Pré-filtro dinâmico

Baseando-se nas recomendações de Di Bernardo et al. (1999) e Franco (2010) para a construção de um Pré-filtro Dinâmico (PFD), representado pela FIGURA 5, adotou-se um fluxo de abastecimento descendente, onde o leito do filtro foi subdividido em três camadas cada qual possuindo 0,2m de espessura e uma faixa específica de granulometria de modo que a camada superficial acomodasse uma faixa de granulometria de pedregulho fino G4 (4,75 e 9,50mm)<sup>2</sup>, a camada

---

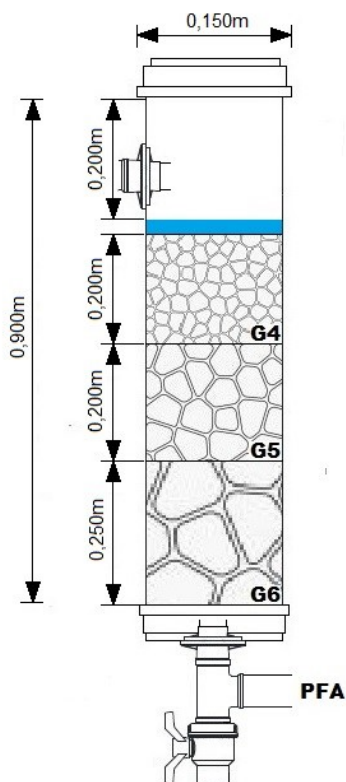
<sup>2</sup> Definição e nomeação das faixas de granulometria de areia e pedregulhos utilizadas na construção dos filtros estão presentes no QUADRO1



intermediária acomodasse uma faixa de granulometria de pedregulho médio G5 (9,50 e 19,00mm), e camada mais próxima a base acomodasse uma faixa de granulometria de pedregulho grosso G6 (19,00 e 25,00mm).

A altura do PFD somou 0,2m de cada uma das três camadas de diferentes granulometrias, 0,05m para camada superficial de água, e mais 0,05m adicionados a camada base para compensar a altura da flange que drenava a água já filtrada, somados ainda a 0,20m de altura do ponto de abastecimento do filtro à borda superior, resultando em 0,90cm de altura final.

FIGURA 5 – Esquema em corte vertical do Pré-filtro Dinâmico (PFD).



Fonte: Autoria própria (2021).

LEGENDA: G4 – Granulometria 4 (4,75 – 9,50mm); G5 – Granulometria 5 (9,50 – 19,00mm); G6 – Granulometria 6(19,00 – 25,00mm); PFA - Pré-filtro de Pedregulho.

Destaca-se ainda que a saída de água já filtrada pelo PFD possuía uma ligação que direcionava a um registro de esgotamento do volume líquido, mantido sempre fechado durante o funcionamento do sistema FiME, e outra ligação junto a etapa de filtração posterior posicionada em uma altura que permitisse um nível de água igual ou acima da superfície do leito filtrante do PFD.

Fez-se o uso da equação da taxa hidráulica de aplicação superficial (EQUAÇÃO 1) para a determinação das dimensões do filtro PFD e volume de água necessário para a alimentação do mesmo (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

$$A = \frac{Q}{TAS} \quad (1)$$

Onde:

A = área da seção (m<sup>2</sup>)

Q = vazão aplicada (m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>)

TAS = taxa hidráulica de aplicação superficial (m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>)

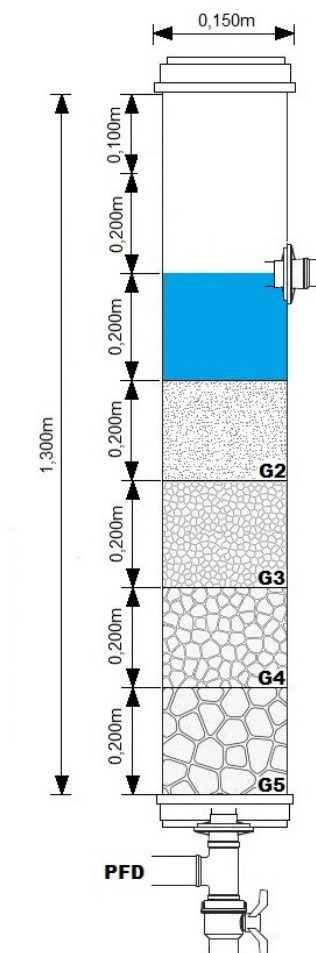
Optou-se pelo uso de uma taxa hidráulica de aplicação superficial semelhante a apresentada por Fava et al. (2020) próxima de 12 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, assim foi possível determinar uma vazão de água bruta necessária para alimentar o filtro de 0,212 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>, visto que o diâmetro interno do PFD gerou uma área de seção de 0,017 m<sup>2</sup>.

### 3.1.3 Pré-filtro de pedregulho

O Pré-filtro de Pedregulho (PFA) foi construído de modo que seu fluxo de filtração apresentasse sentido ascendente, assim tanto a entrada de alimentação quando o ponto de passagem para a etapa de filtração posterior se encontravam acima do meio filtrante, na base deste filtro foi adicionado ainda uma flange e registro para esgotamento do volume líquido.

O meio filtrante foi dividido em quatro camadas de areia e pedregulho com diferentes faixas de granulometrias, cada qual possuindo 0,2m de espessura, e dispostas de maneira decrescente em relação ao fluxo de água ascendente, G5 (9,50 – 19,00mm), G4 (4,75 – 9,50mm), G3 (3,35 – 4,75mm) e G2 (1,18 – 3,35mm), acrescentando-se ainda 0,2m de altura mínima de lamina líquida sobre o topo do meio filtrante antes do ponto de saída, 0,2m de altura entre o ponto saída e o ponto de entrada e 0,1m de altura entre o ponto de saída e a borda superior do filtro. A FIGURA 6 ilustra as camadas do PFA (DI BERNARDO et al., 1999).

FIGURA 6 – Esquema em corte vertical do Pré-filtro de Pedregulho (PFA).



Fonte: Autoria própria (2021).

LEGENDA: G2 – Granulometria 2 (1,18 – 3,35mm); G3 – Granulometria 3 (3,35 – 4,75mm); G4 – Granulometria 4 (4,75 – 9,50mm); G5 – Granulometria 5 (9,50 – 19,00mm).

A vazão de  $0,212 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  aplicada no PFD foi mantida no abastecimento do PFA, assim mantendo-se uma área superficial de  $0,017 \text{ m}^2$ , obteve-se a mesma taxa hidráulica de aplicação superficial de  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  em ambos os filtros.

### 3.1.4 Filtros lentos

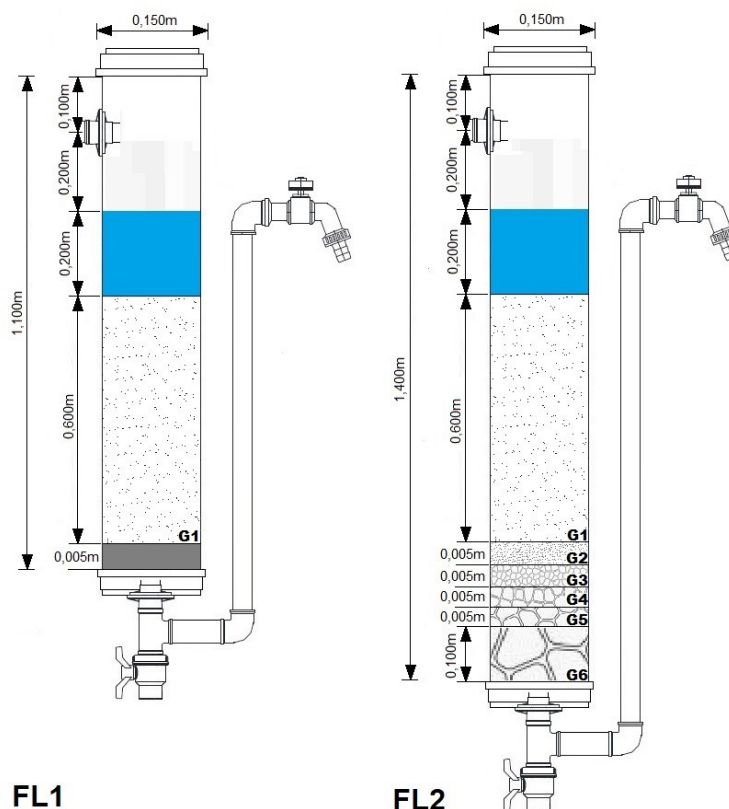
Nos filtros lentos optou-se por uma taxa hidráulica de aplicação superficial reduzida de aproximadamente  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , assim após a passagem pelo PFA o fluxo era dividido igualmente entre dois filtros lentos ambos possuindo um leito filtrante similar composto por uma camada única de areia com faixa de

granulometria G1 (0 – 1,18 mm) e espessura de 0,6m (DI BERNARDO et al., 1999; MENDES et al., 2020).

Os filtros lentos, representados na FIGURA 7, se diferenciavam entre si pela composição da camada suporte. O Filtro Lento 1 (FL1) foi adaptado seguindo os resultados demonstrados por Ferraz e Paterniani (2002) onde a camada suporte composta de material granular foi substituída por três camadas de manta não-tecido geotêxtil agulhado com espessura de 0,005m cada.

Já a construção do Filtro Lento 2 (FL2) seguiu a metodologia proposta por Di Bernardo et al. (1999), cuja camada suporte foi composta por cinco faixas de areia de diferentes granulometrias, com tamanho dos grãos crescente em relação ao fluxo de água G2 (1,18 – 3,35mm), G3 (3,35 – 4,75mm), G4 (4,75 – 9,50mm), G5(9,50 – 19,00mm) E G6 (> 19,00mm).

FIGURA 7 – Esquema do corte vertical dos filtros lentos FL1 e do FL2.



Fonte: Autoria própria (2021).

LEGENDA: G1 – Granulometria 1 (0 – 1,18mm); G2 – Granulometria 2 (1,18 – 3,35mm); G3 – Granulometria 3 (3,35 – 4,75mm); G4 – Granulometria 4 (4,75 – 9,50mm); G5 – Granulometria 5 (9,50 – 19,00mm); G6 – Granulometria 6(19,00 – 25,00mm).

A vazão proveniente do pré-filtro de pedregulho foi portanto dividida entre os dois filtros lentos, assim, aplicando-se a EQUAÇÃO 1, cada filtro lento foi dimensionado com uma área superficial de  $0,017 \text{ m}^2$  para que a taxa hidráulica de aplicação superficial empregada fosse de  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

### 3.1.5 Reservatórios de água para abastecimento do sistema

Os reservatórios de água foram dimensionados observando a vazão diária necessária de  $0,212 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  para alimentar o sistema, assim, com o objetivo de conceder ao sistema uma maior independência. Optou-se por um reservatório com capacidade de  $1 \text{ m}^3$  para armazenamento da água, conferindo cerca de 4,5 dias de independência ao filtro. Este reservatório foi instalado ao lado do sistema FiME e nele também realizou-se a produção da água sintética para abastecimento do sistema, havendo ainda em sua estrutura uma bomba de água responsável por recircular o líquido criando uma agitação suave no seu interior.

Uma segunda bomba presente neste primeiro reservatório foi responsável por recalcar a água sintética até um segundo reservatório instalado a uma altura superior para alimentação da primeira etapa de filtração, assim, deste ponto em diante, o fluxo de água no filtro poderia ser controlado utilizando a força gravitacional, a partir de um sistema de registros instalados nas entradas e saídas de cada etapa do sistema.

O segundo reservatório possuía capacidade de  $0,25 \text{ m}^3$  e equipou-se o mesmo com uma boia de nível ligada a bomba de recalque do primeiro reservatório, assim eliminou-se o risco da alimentação exceder a capacidade do segundo reservatório.

### 3.1.6 Preparação dos materiais utilizados na composição dos leitos dos filtros

Quanto ao material granular, areia e pedregulho, utilizado na composição dos leitos dos filtros, a escolha correta das faixas de granulometria assim como seu grau de limpeza, diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade são fatores que estão diretamente relacionados com os níveis de eficiência de remoção de impurezas a serem apresentados nos filtros (TESTEZLAF, 2014).

Para o preparo do material granular, areia e pedregulho, priorizou-se a lavagem com água límpida de modo a remover ao máximo todas e quaisquer impurezas presentes em seu meio e em sua superfície. O material granular foi colocado em baldes com água e agitado manualmente, após a agitação esperava-se alguns segundos para que a areia e a água se separassem por ação da gravidade, então descartava-se a água. Este procedimento era realizado até que a água após agitação não mais apresentasse cor ou material suspenso visível a olho nu (FREITAS, 2017).

A secagem do material granular lavado se deu em estufa a 105°C durante 24 horas e as faixas de granulometrias do meio filtrante granular de areia e pedregulho foram separadas com o auxílio de um separador/agitador granulométrico (ROSA, 2017).

Adaptando metodologia proposta por Di Bernardo et al. (1999) e observando critérios como composição granulométrica da camada de leito filtrante, coeficiente de uniformidade e tamanho efetivo dos grãos de areia apresentados em estudos de Franco et al. (2012) e Medeiros et al. (2020), separou-se as faixas de areia (QUADRO 1) utilizando um conjunto de peneiras com as granulometrias 1,18; 3,35; 4,75; 9,50; 19,00 e 25,00mm.

QUADRO 1 – Faixas de granulometria.

Rótulo	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Faixa de granulometria (mm)	0 – 1,18	1,18 – 3,35	3,35 – 4,75	4,75 – 9,50	9,50 – 19,0	19,0 – 25,0

FONTE: Autoria própria (2021).

Uma vez separadas as faixas de granulometria, com exceção da faixa G6, foi coletado uma amostra representativa de cada e submetido ao ensaio granulométrico descrito pela NBR NM 248/2003 (Determinação da composição granulométrica) e NBR 11799/2016 (Material filtrante areia, antracito e pedregulho), de maneira a realizar a caracterização das propriedades físicas do meio filtrante por meio da construção da curva granulométrica (ABNT, 2003; ABNT, 2016).

Observando os conceitos definidos pela NBR 6502/1995 (Rochas e Solos) foi possível a coleta dos dados de diâmetro de grão correspondente aos 60% mais

finos na curva granulométrica ( $D_{60}$ ) e diâmetro de grão correspondente aos 10% mais finos na curva granulométrica ( $D_{10}$ ), e conseqüentemente a determinação do coeficiente de uniformidade (CU) através da EQUAÇÃO 2 (ABNT, 1995).

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

Onde:

CU= Coeficiente de uniformidade.

$D_{60}$ = Diâmetro de grão correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica.

$D_{10}$ = Diâmetro de grão correspondente aos 10% mais finos na curva granulométrica.

Foi determinado também o tamanho efetivo dos grãos, valor este igual ao diâmetro de grão correspondente aos 10% mais finos na curva granulométrica ( $D_{10}$ ), e quando o coeficiente de uniformidade não satisfizesse a condição  $<5$  (Solo uniforme), realizava-se novamente o peneiramento e caracterização da faixa de areia respectiva até que esta condição se tornasse verdadeira (ABNT, 1995).

## 3.2 FASE 2: PREPARAÇÃO, OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DAS FASES EXPERIMENTAIS

### 3.2.1 Produção da água utilizada para o abastecimento do sistema FiME

A vazão diária necessária de  $0,212 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  para alimentar o sistema multiplicada por 21 dias de funcionamento de cada uma das três carreiras de filtração resultou em um volume de água de aproximadamente  $13 \text{ m}^3$  de água a ser utilizada para alimentar o sistema FiME durante os experimentos de avaliação. Em vista desse alto volume e devido a localidade da instalação do sistema de FiME estar distante de corpos hídricos, optou-se pelo uso de uma água sintética fabricada em laboratório e que apresentasse características que evidenciassem a eficiência do sistema.

Adaptou-se as metodologias de Mendes (1989) e Freitas (2017) para a produção da água sintética pelo uso da caulinita (argilo-mineral) de maneira a adicionar valores de parâmetros como turbidez e cor. Assim adicionou-se 300g de

caulinita a 15 litros de água destilada, mantendo a solução em agitação a 180 rpm durante duas horas em aparelho Jar-test e após a agitação a solução foi mantida por um período de quinze horas em repouso onde ao final retirou-se o material sobrenadante formado.

A solução resultante, chamada de solução original, pode então ser utilizada para adicionar turbidez e cor à água, porém, para determinar o volume necessário de solução original a ser aplicada para preparação da água sintética foi construída uma curva de diluição representando a turbidez gerada resultado da diluição de diferentes volumes de sobrenadante. A partir dessa curva de diluição foi possível produzir uma água sintética sempre próxima ao valor de 100uT, valor este objetivo alvo para abastecimento do sistema durante as três carreiras de filtração (FRANCO et al., 2012).

### 3.2.2 Operação do sistema e segregação das etapas experimentais

De modo a avaliar a eficiência do sistema, observando um conjunto de parâmetros físicos e químicos da água, foram realizadas três carreiras de filtração diferenciadas entre si pela adição ou não de soluções coagulantes, e pelo tipo de solução coagulante utilizada em cada uma.

A primeira carreira de filtração (C1) foi realizada sem a adição de agentes coagulantes, apresentando o objetivo principal de avaliar a eficiência do tratamento físico proporcionado pelo sistema FiME apenas, esta carreira assume grande importância no quadro comparativo para avaliação da eficiência somada ou não quando feita a adição dos agentes coagulantes ao sistema FiME nas carreiras de filtração posteriores.

Durante a segunda carreira de filtração (C2) aplicou-se uma solução de coagulante inorgânico produzida a base de Sulfato de alumínio, agente coagulante este costumeiramente utilizado nos sistemas de tratamento de água convencionalmente utilizados no Brasil.

A terceira carreira de filtração (C3) por sua vez, diferenciou-se pela aplicação de uma solução de coagulante produzida a partir da semente de *Moringa oleifera*, sendo este um agente coagulante orgânico que não produz resíduos e lodos com elementos contaminantes.



Como durante as três carreiras produzidas no sistema FiME as etapas de pré-filtração dinâmica, pré-filtração de pedregulho e filtração lenta funcionavam em série, e havia a presença de dois filtros lentos funcionando em paralelo, obteve-se como resultado dois tratamentos por carreira, no Tratamento 1 a água sintética percorria um caminho passando pelos filtros PFD+PFA+FL1 e no Tratamento 2 a água sintética percorria um caminho passando pelos filtros PFD+PFA+FL2. Deste modo gerou-se os tratamentos apresentados na TABELA 1.

TABELA 1 – Tratamentos resultados das carreiras de filtração.

Tratamentos	Carreira de filtração	Fluxo através dos filtros	Coagulante empregado
T1C1	1° Carreira de filtração	PFD+PFA+FL1	-
T2C1	1° Carreira de filtração	PFD+PFA+FL2	-
T1C2	2° Carreira de filtração	PFD+PFA+FL1	Sulfato de alumínio
T2C2	2° Carreira de filtração	PFD+PFA+FL2	Sulfato de alumínio
T1C3	3° Carreira de filtração	PFD+PFA+FL1	<i>Moringa oleifera</i>
T2C3	3° Carreira de filtração	PFD+PFA+FL2	<i>Moringa oleifera</i>

Fonte: Autoria própria (2020).

LEGENDA: PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2

No início de todas as carreiras aguardava-se um intervalo de dois dias de funcionamento do sistema FiME antes de dar-se início a coleta de dados dos parâmetros pré-determinados para as análises de eficiência, este período era respeitado para regular e observar vazões, fluxos e possíveis vazamentos, e garantir que o sistema estivesse funcionando da maneira mais correta possível.

A duração das carreiras de filtração foi determinada ou pela saturação dos filtros lentos ou após três semanas de funcionamento do sistema. A saturação dos filtros lentos foi determinada uma vez que a perda de carga em cada filtro lento chegasse a uma máxima de 0,2m. Uma vez atingida a perda de carga máxima nos corpos dos filtros lentos encerrava-se as carreiras de filtração. Caso após três semanas desde o início da carreira de filtração a perda de carga nos filtros lentos não houvesse atingido seu valor máximo, a carreira também era encerrada.

Ao final das carreiras de filtração o material presente no leito dos filtros era removido e substituído por outro de características semelhantes e limpo,

reestruturando-se todo o sistema novamente para a execução da próxima carreira de filtração.

Na segunda carreira de filtração onde houve a aplicação da solução coagulante de Sulfato de alumínio, e na terceira carreira de filtração onde houve a aplicação da solução coagulante produzida a partir da semente da *Moringa oleifera*, o ponto de aplicação escolhido foi logo antes da entrada no PFD, como pode ser observado na FIGURA 8.

A escolha deste ponto de aplicação foi realizada observando fatores como o tempo necessário para o processo de desestabilização das partículas e formação de floco, e o fluxo mais intenso no início do sistema FiME o que proporcionaria melhor homogeneização entre a água sintética e a solução coagulante (ARANTES et al., 2012; BETTELHEIM et al., 2016).

FIGURA 8 – Ponto de aplicação do coagulante na segunda e terceira carreira de filtração.



Fonte: Autoria própria (2021).

As soluções de coagulantes foram aplicadas por meio de um conta-gotas ligado a um tanque de abastecimento de dois litros, o volume de dosagem era checado três vezes ao dia de modo a garantir a dosagem mais próxima possível do estipulado.

### 3.2.2.1 Sulfato de alumínio

Para a produção da solução coagulante de Sulfato de alumínio foi solubilizado 1g em 1L de água destilada, formando uma solução 1% com concentração de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ . A partir desta solução realizou-se ensaios em equipamento Jar-Test de modo a determinar a concentração ideal para aplicar na água sintética de 100NTU de turbidez.

A solução coagulante foi aplicada em concentrações de 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10 e  $12 \text{ mg.L}^{-1}$  nos jarros do Jar-test onde respeitou-se após a aplicação dos coagulantes 3 minutos a 150rpm e 10 minutos a 15rpm, passado estes tempos desligou-se o Jar-test e coletou-se a primeira amostra, uma segunda amostra foi coletada 10 minutos após desligado o Jar-test e avaliou-se a formação de flocos, níveis de turbidez e pH das amostras para a escolha da concentração de solução coagulante a ser aplicada no sistema FiME (THEODORO, 2012).

### 3.2.2.2 *Moringa oleifera*

A solução coagulante a base de semente de *Moringa oleifera* foi aplicada por meio de uma solução produzida a partir de sementes recém colhidas nas árvores presentes no campus de Londrina da Universidade Tecnológica federal do Paraná (UTFPR-LD). Estas sementes foram removidas das vagens e, com a casca, foram dispostas em dessecador por 24 horas para remoção de umidade natural. A solução foi então preparada utilizando 10g da semente descascada, 1mol de NaCl e 1L de água destilada, esses elementos foram homogeneizados e triturados em um liquidificador, e coados em coador de pano para remover a matéria orgânica grosseira (FORMENTINI-SCHMITR et al., 2014; MADRONA et al., 2010)

Para determinação da dosagem a ser aplicada realizou-se o mesmo procedimento adotado para a determinação da concentração de solução coagulante de Sulfato de Alumínio.

### 3.2.3 Pontos de monitoramento e parâmetros analisados

De modo a garantir maior controle sobre o sistema coletou-se amostras para monitoramento da eficiência do sistema FiME em vários pontos como pode

ser observado na FIGURA 9. A coleta de amostras no ponto de abastecimento do sistema e na saída de todas as etapas de filtração possibilitou não apenas uma análise da eficiência do sistema como um todo, mas também uma análise individual da eficiência de cada etapa de filtração.

FIGURA 9 – Pontos de monitoramento do sistema.



Fonte: Autoria própria (2021).

Os pontos de coleta foram nomeados como Água sintética (AS), localizado no tanque de abastecimento do sistema, Pré-filtro dinâmico(PFD) localizado na saída do PFD, Pré-filtro de pedregulho(PFA), localizado na saída do PFA, Filtro lento 1(FL1) localizado na saída do FL1, e Filtro lento 2(FL2) localizado na saída do FL2.

As análises das amostras coletadas nos pontos de monitoramento observaram os parâmetros pH, temperatura, condutividade elétrica, turbidez, cor aparente, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais e perda de carga. As metodologias utilizadas para a determinação de cada parâmetros

foram realizadas conforme os procedimentos descritos por APHA (2017) presentes na TABELA 2.

TABELA 2 – Parâmetros, metodologia, equipamento e frequência de monitoramento adotados nas análises das amostras.

Parâmetro	Método	Equipamento	Frequência de monitoramento
Temperatura (°C)	2550	Condutivimetro Thermo Scientific Orion 3 Star Plus	3x/dia
Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2510 -B	Condutivimetro Thermo Scientific Orion 3 Star Plus	3x/dia
pH	4500-H <sup>+</sup>	pHmetro MS Tecnopron mPA-210	3x/dia
Turbidez (uT)	2130	Turbidímetro DEL LAB DLT-WV	3x/dia
Cor aparente (uH)	2120	Espectrofotômetro UV-VIS S60 Libra BIOCHROM	1x/dia
Perda de carga (cm)	-	-	1x/dia
Sólidos totais ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2540 -B	Estufa de esterilização e secagem EDUTECH DHG - 9140A	1x/semana
Sólidos dissolvidos totais ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2540 -C	Estufa de esterilização e secagem EDUTECH DHG - 9140A	1x/semana
Sólidos suspensos totais ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2540 - D	Estufa de esterilização e secagem EDUTECH DHG - 9140A	1x/semana

Fonte: Autoria própria (2021).

Observou-se também, com frequência de três vezes ao dia dados de vazão de entrada em cada uma das etapas de filtração a título de monitoramento da confiabilidade do sistema. Nenhuma análise foi realizada aos sábados, domingos e feriados, mesmo o sistema continuando a funcionar ininterruptamente.

### 3.3 FASE 3: ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COLETADOS

Ao final de cada carreira de filtração, para cada parâmetro e cada unidade de filtração, foi aplicado uma análise estatística descritiva através do uso do software RStudio, de modo a se determinar a média dos valores, a média das eficiências de remoção do parâmetro em cada etapa de filtração e a média das eficiências de remoção nas etapas de filtração somadas, foi realizado ainda os cálculos para desvio padrão e intervalo de confiança com nível de 95% para estes valores médios finais.

Utilizou-se o diagrama de caixa (Box Plot) para a determinação de importantes aspectos como a dispersão ou variabilidade, a tendência central ou posição, o afastamento de simetria e a identificação de observações de valores outliers, valores discrepantes. Estes gráficos foram empregados na comparação entre o comportamento dos dados observados nas diferentes carreiras (MANN, 2015).

Para comparação entre os diferentes tratamentos empregados durante as carreiras de filtração, foi aplicado a Análise de Variância (ANOVA) fator único apresentado no APÊNDICE 1, neste procedimento é testado a existência entre duas hipóteses, a primeira, hipótese nula afirmando que as médias aritméticas de três ou mais conjuntos de dados são iguais, a segunda, hipótese alternativa afirmando que as médias aritméticas dos conjuntos de dados não são todas iguais (KOKOSKA, 2013).

O nível de significância denotado por “p” a ser adotado nesta análise foi de 5%, assim valores de  $p < 0,05$  indicam que há diferença significativa entre os dados investigados, por sua vez, valores de  $p > 0,05$  indicam a não existência de diferença significativa entre os dados investigados (MANN, 2015).

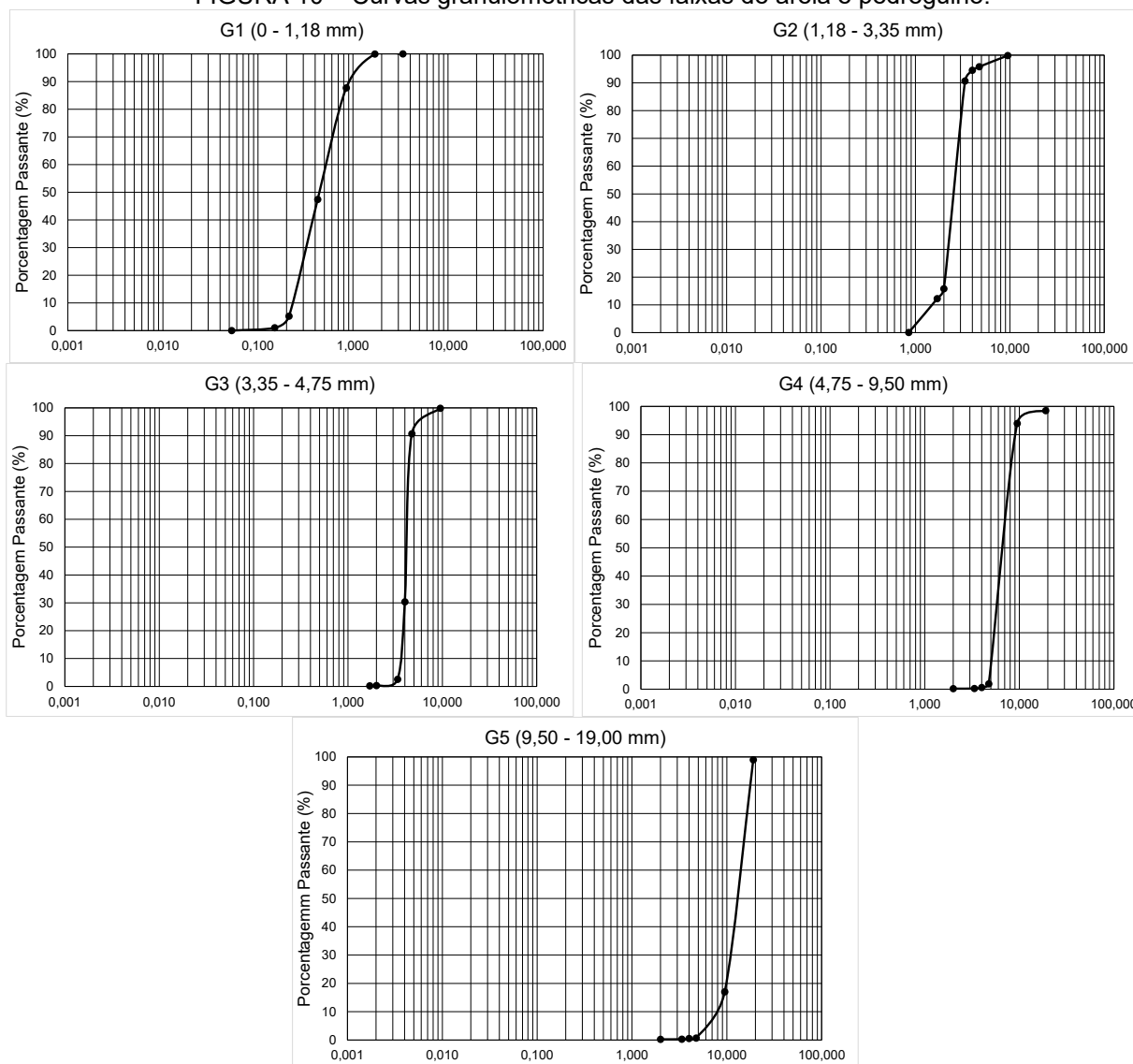
Nos casos onde houver a confirmação da hipótese alternativa, indicando a presença de diferença significativa entre os conjuntos de dados comparados, haverá a necessidade da aplicação do teste de Tukey de maneira a se identificar entre quais tratamentos ocorreram estas diferenças significativas.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para garantir que o meio filtrante estivesse de acordo com as recomendações de Di Bernardo et al. (1999), realizou-se os ensaios granulométricos das faixas de areia e pedregulho, previamente limpas e separadas, de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 11799/2016 para a construção das curvas de distribuição granulométrica representadas na FIGURA 10 (ABNT, 2016).

FIGURA 10 – Curvas granulométricas das faixas de areia e pedregulho.



FONTE: Autoria própria (2021).

Durante os ensaios o jogo de peneiras granulométricas utilizadas não possuía nenhuma peneira entre as granulometrias 19,0 e 25,0mm portanto, não foi construída a curva granulométrica referente a faixa de granulometrias G6 (19,0 – 25,0mm), considerando assim esta faixa de granulometria como uniforme.

Para as demais granulometrias, as curvas de distribuição granulométrica permitiram a determinação do coeficiente de uniformidade (CU), diâmetro de grão correspondente aos 60% mais finos ( $D_{60}$ ) e diâmetro de grão correspondente aos 10% mais finos ( $D_{10}$ ), este último também sendo definido pela NBR 6502/1995 como o tamanho ou diâmetro efetivo dos grãos, estes dados são apresentados na TABELA 3 (ABNT, 1995).

TABELA 3 – Parâmetros de distribuição granulométrica do material utilizado neste experimento.

Faixa de granulometria	$D_{10}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	CU
G1	0,23	0,56	2,43
G2	1,55	2,80	1,81
G3	3,60	4,15	1,15
G4	5,00	7,00	1,40
G5	8,00	10,40	1,30
G6	-	-	-

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: G1 – Granulometria 1; G2 – Granulometria 2; G3 – Granulometria 3; G4 – Granulometria 4; G5 – Granulometria 5; G6 – Granulometria 6; CU – Coeficiente de uniformidade;  $D_{10}$  – Diâmetro de grão correspondente aos 10% mais finos;  $D_{60}$  – Diâmetro de grão correspondente aos 60% mais finos.

A NBR 6502/1995 define areia como partículas com diâmetros compreendidos entre 0,06 e 2,0mm, portanto apenas a granulometria G1 pode ser classificada como areia, as demais granulometrias entram na classificação de pedregulho. Observa-se então, que a granulometria de areia G1 apresentou diâmetro efetivo dos grãos de 0,23mm, se enquadrando à faixa recomendada por Di Bernardo et al. (1999) de 0,15 a 0,25mm para filtros lentos de areia, e bem próxima ao recomendado por CAWST (2010), de 0,15 a 0,20mm, para filtros lentos de areia em escala domiciliar (ABNT, 1995).

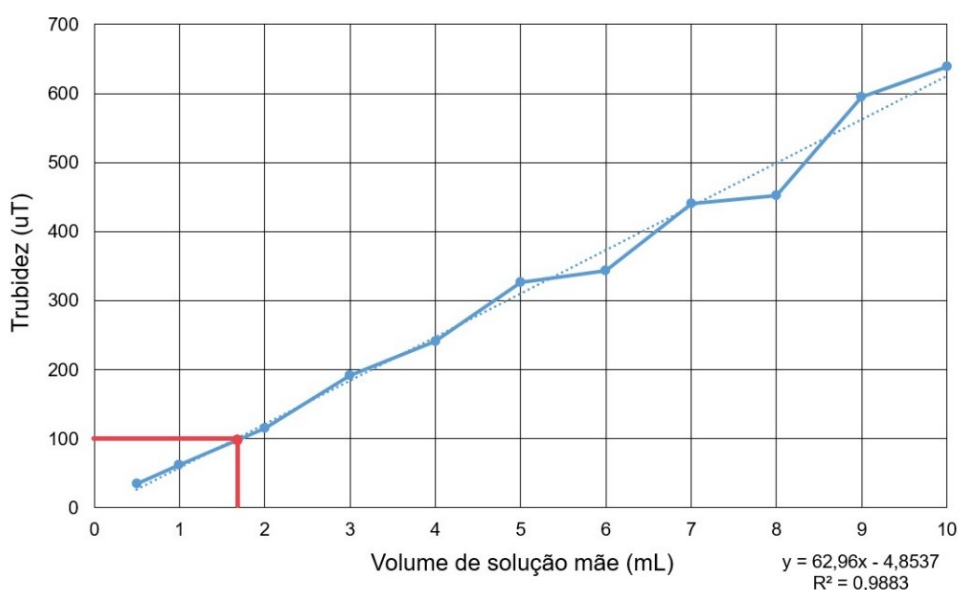


Quanto ao coeficiente de uniformidade apresentado pela granulometria de areia G1 de 2,43, este se encaixa em ambas as recomendações dos autores citados acima, de 1,5 a 2,5. Quanto as demais granulometrias, todas podem ser classificadas como solos uniformes seguindo a definição proposta pela NBR 6502/1995 para solos que apresentem coeficiente de uniformidade menor que 5 (ABNT, 1995).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SINTÉTICA

Construiu-se uma curva (FIGURA 11) representada pela turbidez resultante da diluição de diferentes volumes de solução original em um litro de água, de modo a estabelecer o volume necessário para preparação da água sintética com determinado valor padrão de turbidez (100uT) para ser utilizado em todo o experimento.

FIGURA 11 – Variação da turbidez em função do volume de solução original.



FONTE: Autoria própria (2021).

O valor de  $R^2$  de 0,9883 indica a proximidade da curva à linha de tendência, e a partir da equação da reta foi possível encontrar o valor aproximado de 1,66mL de volume de solução original, a ser aplicada em um litro de água, responsável por conferir à água a característica de 100uT de turbidez. Assim, a produção da curva de diluição pôde então otimizar a produção de água sintética economizando volume de

solução original e adicionando maior controle nos níveis de turbidez da água sintética produzida.

A caracterização da água sintética (TABELA 4) quanto aos parâmetros definidos para a análise da eficiência do sistema foi realizada a partir da média dos dados coletados da água sintética produzida durante as três carreiras de filtração.

TABELA 4 – Caracterização da água sintética utilizada para abastecimento do sistema FiME.

Parâmetro	Média geral
Turbidez (uT)	106,76 ± 3,06
Temperatura (°C)	24,67 ± 0,41
Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	83,91 ± 0,52
pH	6,83 ± 0,03
Cor aparente (uH)	111,61 ± 9,45
Sólidos totais ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	259,47 ± 41,74
Sólidos suspensos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	52,78 ± 9,74
Sólidos dissolvidos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	185,21 ± 54,28

Fonte: Autoria própria (2020).

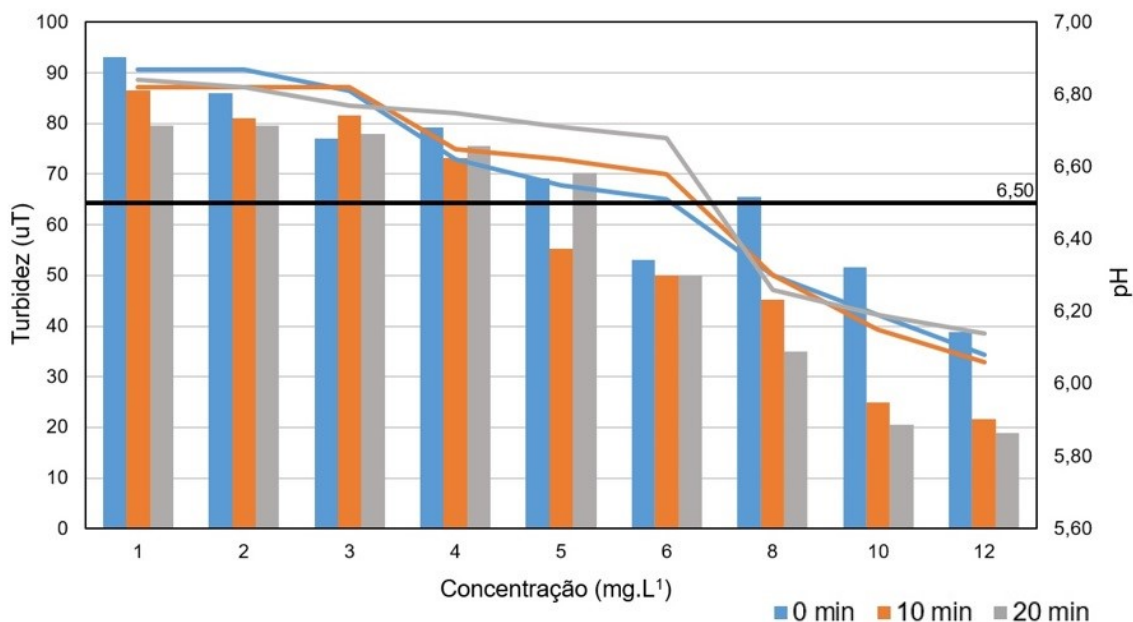
Observa-se que a média de turbidez se manteve próxima ao valor estimado desde o início do planejamento experimental de 100uT, e o valor médio de cor aparente se estabeleceu em 111,61uH. Vale ainda ressaltar que mesmo após a adição destes valores de turbidez e cor aparente na água o valor médio de sólidos totais se estabeleceu em 259,47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , valor este abaixo do limite máximo de 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  estabelecido por legislação segundo Brasil (2021) através da Portaria GM/MS Nº 888.

### 4.3 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE APLICAÇÃO DOS COAGULANTES

#### 4.3.1 Sulfato de alumínio

Os ensaios de Jarrest realizados para a definição da concentração de solução coagulante de Sulfato de alumínio a ser aplicada no tratamento observaram a influência de diferentes concentrações nos parâmetros turbidez e pH da água sintética contendo valores iniciais de 100uT e 6,82, respectivamente. Os resultados são apresentados na FIGURA 12.

FIGURA 12 – Variação da turbidez e pH em função da concentração de aplicação da solução coagulante de Sulfato de alumínio.



FONTE: Autoria própria (2021).

NOTA: Barras representam valores de turbidez (eixo principal) e linhas representam valores de pH (eixo secundário).

As menores concentrações aplicadas na água sintética não foram suficientes para alterações nos valores de pH ao mesmo passo que não apresentaram altas reduções de turbidez que variou de 100uT para 79,6uT após 20 minutos com aplicação de 1mg.L<sup>-1</sup> de concentração da solução de Sulfato de alumínio. Nas concentrações maiores, 8, 10 e 12mg.L<sup>-1</sup> observou-se maior redução nos valores de turbidez já no instante inicial, reduzindo de 100uT para 65,5, 51,5 e 38,8uT, respectivamente, quanto aos valores de pH, estas concentrações também apresentaram reduções expressivas produzindo valores abaixo de 6,5 durante todos os momentos de observação.

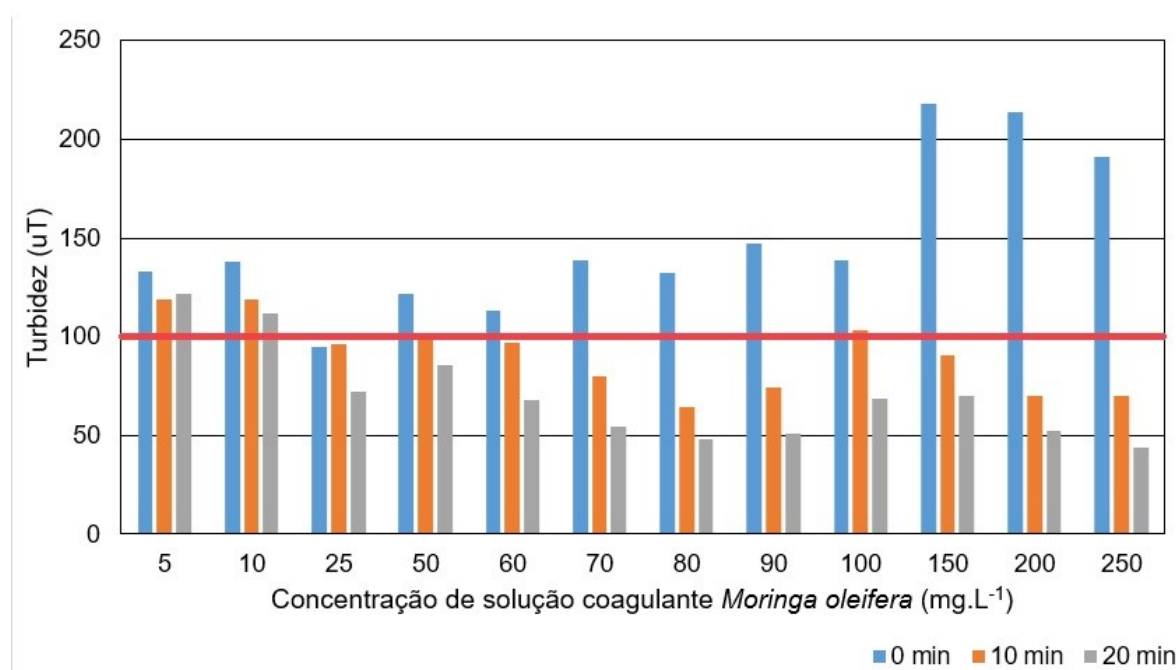
Segundo Brandt et al. (2017), o pH ótimo para a coagulação no tratamento de águas superficiais por coagulantes a base de Sulfato de alumínio se encontra na faixa de 6,5 a 7,2. Fernandes et al. (2010) vai além e cita valores de pH ótimo entre 6,8 e 6,9 quando utilizado concentrações de coagulante a base de Sulfato de alumínio entre 6 e 9mg.L<sup>-1</sup>.

Observando as considerações destes autores e os resultados obtidos nos ensaios, optou-se pela escolha de uma concentração de aplicação de solução de Sulfato de alumínio de  $6\text{mg.L}^{-1}$  durante a segunda carreira de filtração, uma vez que houve redução de 46,8% de turbidez já no instante inicial de aplicação, e a média dos valores de pH da água sintética 6,82 se manteve dentro das faixas ótimas de aplicação sugeridas (BRANDT et al. 2017; BRASIL, 2021).

#### 4.3.2 Moringa oleifera

A produção da solução coagulante extraída da semente de *Moringa oleifera* foi realizada observando a metodologia apresentada por Formentini-Schmitt et al. (2014), que neste mesmo estudo concluiu que o uso deste coagulante não altera significativamente o pH das águas. Deste modo, uma vez que não observou-se a necessidade de correção do pH em função do uso da solução coagulante de *Moringa oleifera*, foi observado apenas a remoção de turbidez decorrente de diferentes concentrações da solução coagulante, apresentados na FIGURA 13, para a escolha da concentração a ser utilizada na terceira carreira de filtração.

FIGURA 13 – Variação da turbidez em função do volume de solução coagulante *Moringa oleifera*.



FONTE: Autoria própria (2021).

Todas as concentrações de solução coagulante de *Moringa oleifera* foram aplicadas à água sintética onde observou-se que, com exceção da concentração 25mg.L<sup>-1</sup>, todas as demais adicionaram turbidez à água sintética no momento inicial do ensaio, fato este que pode ser atribuído a altas concentrações de matéria orgânica presente na solução coagulante de *Moringa oleifera*.

Pode-se observar também que concentrações menores de solução coagulante de *Moringa oleifera* não apresentaram altas taxas de remoção de turbidez ao mesmo tempo em que concentrações mais altas do coagulante multiplicaram a concentração de sólidos suspensos presentes na água sintética, fato que poderia acelerar a saturação dos filtros, optou-se portanto por uma concentração intermediária da solução coagulante *Moringa oleifera* de 80mg.L<sup>-1</sup>, onde a turbidez foi reduzida para 64,60uT nos primeiros 10 minutos e 47,90uT após 20 minutos.

#### 4.4 TEMPERATURA E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Na TABELA 5 são representados os valores médios dos parâmetros temperatura (°C) e condutividade elétrica (μS.cm<sup>-1</sup>) coletados ao longo das etapas de tratamento de cada uma das três carreiras de filtração desenvolvidas no sistema FIME, assim como seus respectivos intervalos de confiança.

TABELA 5 – Médias de temperatura e condutividade elétrica durante as carreiras de filtração.

Carreiras de filtração	Parâmetro	Etapas do sistema FIME				
		AS	PFD	PFA	FL1	FL2
C1	Temperatura (°C)	26,99 ± 0,44	26,99 ± 0,48	26,90 ± 0,51	26,68 ± 0,57	26,65 ± 0,61
	Condutividade elétrica (μS.cm <sup>-1</sup> )	86,44 ± 0,43	86,00 ± 0,23	87,14 ± 0,42	88,88 ± 2,14	89,78 ± 2,20
C2	Temperatura (°C)	24,64 ± 0,21	24,58 ± 0,21	24,33 ± 0,23	24,04 ± 0,24	24,05 ± 0,24
	Condutividade elétrica (μS.cm <sup>-1</sup> )	81,30 ± 0,43	81,35 ± 0,33	83,13 ± 0,65	82,99 ± 0,57	83,53 ± 0,59
C3	Temperatura (°C)	21,96 ± 0,22	21,89 ± 0,25	21,72 ± 0,27	21,49 ± 0,28	21,43 ± 0,29
	Condutividade elétrica (μS.cm <sup>-1</sup> )	84,32 ± 0,88	896,48 ± 179,04	896,79 ± 211,74	641,60 ± 196,60	706,11 ± 210,36

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Tomando em consideração os conjuntos de dados de temperatura das etapas de tratamento de cada uma das três carreiras de filtração observa-se que não houve grandes variações ao longo das etapas, já as diferenças entre as temperaturas registradas se compararmos as carreiras de filtração uma com as outras é explicada pelo fato de que cada carreira foi realizada em meses diferentes do ano, onde C1 foi desenvolvida entre os dias 20/03 e 07/04 do ano de 2021, a C2 entre os dias 17/04 e 07/05 do ano de 2021, e C3 entre os dias 25/05 e 11/06 do ano de 2021.

Observando os dados da TABELA 5 para as médias de condutividade elétrica nas etapas do sistema, percebe-se que durante C1 não houve grandes alterações e variações, durante C3 o valor de condutividade elétrica presente na água sintética (AS) permaneceu em um nível constante e próximo aos apresentados durante C1 e C2, já após a passagem pelo PFD a média do parâmetro se multiplicou se comparado a AS, este fato é atribuído a adição do coagulante *Moringa oleifera* nesta etapa.

A solução coagulante de *Moringa oleifera* foi fabricada adaptando-se as metodologias de Formentini-Schmitr et al. (2014) e Madrona et al. (2010) onde é adicionado como um dos componentes da solução o Cloreto de Sódio (NaCl) na concentração de 1M por litro. O NaCl é formado por uma ligação iônica entre suas moléculas que quando adicionada a água sofre dissociação iônica formando os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , estas espécies eletricamente carregadas possuem alta facilidade em transportar suas cargas fator que caracteriza condutividade elétrica e explica a elevação deste parâmetro após a adição da solução coagulante de *Moringa oleifera* (BETTELHEIM et al. 2016).

Optou-se por não aplicar análise estatística nos dados de temperatura por não haver nenhuma grande alteração visível na TABELA 5 e por não haver limites delimitados por meio da legislação vigente segundo Brasil (2021) através da Portaria GM/MS Nº 888. Já para os dados de condutividade elétrica optou-se pela aplicação da análise estatística ANOVA uma vez que notou-se grandes alterações nos valores principalmente durante a terceira carreira de filtração.

Os Valor-P resultados da ANOVA realizada para as três carreiras de filtração permaneceram menor que o valor de 0,05 estipulado pelo nível de significância, para os três casos, indicando diferença significativa entre os grupos, assim foi necessário a aplicação do teste de Tukey, com resultados representados na TABELA 6.

TABELA 6 – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro condutividade elétrica.

Teste de Tukey com 95% de nível de confiança			
Comparações	C1	C2	C3
AS-PFD	0,9956	0,6099	4,6E-08 *
AS-PFA	0,9571	3,6E-05 *	4,5E-08 *
AS-FL1	0,1029	1,7E-04 *	3,4E-04 *
AS-FL2	0,0195 *	1,2E-05 *	4,4E-05 *
PFD-PFA	0,8194	9,0E-03 *	1,0000
PFD-FL1	0,0393 *	0,0279 *	0,2976
PFD-FL2	0,0059 *	1,0E-04 *	0,5942
PFA-FL1	0,3939	0,9965	0,2964
PFA-FL2	0,1217	0,7626	0,5927
FL1 - FL2	0,9712	0,5393	0,9879

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: (\*) – Diferença significativa; AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Brasil (2021), através da Portaria GM/MS Nº 888, determina o monitoramento do parâmetro condutividade elétrica para sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano quando supridos por manancial subterrâneo porém não determina valores máximos e mínimos permitidos, tornando o parâmetros um complemento quando associado a outros.

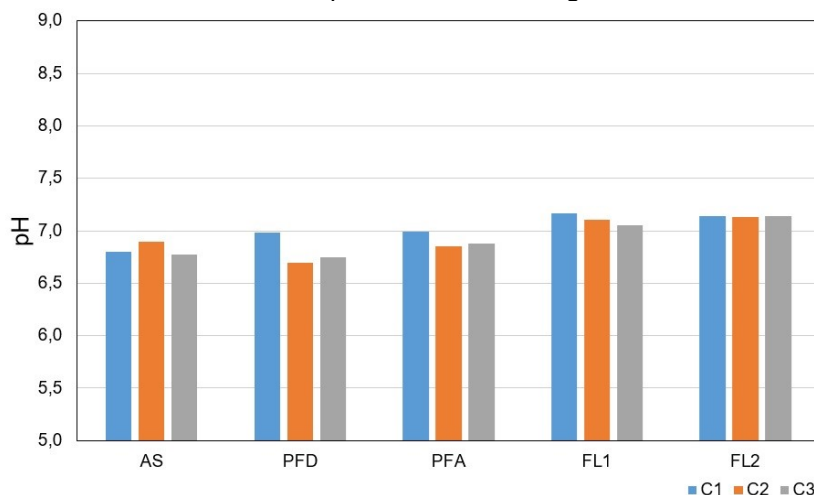
Assim, as variações significativas identificadas pelos valores abaixo de 0,05 na TABELA 6, durante C1 e C2 de filtração assumem um menor grau de importância uma vez que quando olhamos seus valores médios presentes na TABELA 5 não houve grandes alterações, porém quando cruzamos os valores médios presentes na TABELA 5 e as diferenças significativas identificadas na TABELA 6 fica claro uma alteração maior do parâmetro na terceira carreira de filtração, no ponto onde ocorre a aplicação da solução de coagulante *Moringa oleifera*, o que ajuda a comprovar estatisticamente o efeito da solução coagulante na alteração do parâmetro condutividade elétrica atribuído ao componente NaCl.

#### 4.5 pH

O comportamento dos valores médios de pH coletados ao logo das etapas de filtração do sistema FIME é ilustrado pela FIGURA 14, onde pode-se observar a pouca variação deste parâmetro, com leve tendência de alta ao decorrer das etapas de

tratamento uma vez que é possível identificar os valores médios abaixo de 7,0 na água sintética utilizada para abastecer as três carreiras, e valores médios acima de 7,0 na saída dos FLs 1 e 2 durante o processo.

FIGURA 14 – Valores médios de pH coletados ao longo das carreiras de filtração.



FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Na TABELA 7 onde pode-se observar os valores médios de pH coletados e seus respectivos intervalos de confiança, também nota-se um comportamento de alta de pH ao decorrer das etapas de tratamento com um aumento entre 0,3 e 0,4 entre os valores observados em AS e os valores observados na saída dos FLs, em C1 por exemplo, observa-se valores de pH em AS de 6,80 e valores de 7,17 e 7,14 na saída dos FLs 1 e 2 respectivamente.

TABELA 7 – Médias de pH durante as três carreiras de filtração.

Etapas do tratamento	C1	C2	C3
AS	6,80 ± 0,04	6,89 ± 0,05	6,77 ± 0,04
PFD	6,98 ± 0,03	6,70 ± 0,09	6,75 ± 0,05
PFA	6,99 ± 0,03	6,85 ± 0,07	6,88 ± 0,08
FL1	7,17 ± 0,03	7,10 ± 0,04	7,05 ± 0,06
FL2	7,14 ± 0,04	7,13 ± 0,04	7,14 ± 0,07

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.



Aplicando a análise de variância ANOVA fator único aos dados de pH coletados durante cada uma das três carreiras de filtração em separado, foi possível observar os Valor-P abaixo de 0,05 estipulado pelo intervalo de confiança aplicado, indicando a presença de diferença significativa entre os grupos. Fez-se necessário então a aplicação do teste de Tukey com resultados representados na TABELA 8, de maneira a identificar quantos e entre quais conjuntos de dados existem estas diferenças significativas.

TABELA 8 – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro pH.

Teste de Tukey com 95% de nível de confiança			
Comparações	C1	C2	C3
AS-PFD	1,5E-09 *	1,6E-04 *	0,9807
AS-PFA	6,2E-11 *	0,8538	0,1298
AS-FL1	< 2,0E-16 *	4,8E-05 *	7,0E-08 *
AS-FL2	< 2,0E-16 *	4,1E-06 *	1,7E-12 *
PFD-PFA	0,9789	6,9E-03 *	0,0317 *
PFD-FL1	1,3E-10 *	7,8E-15 *	3,8E-09 *
PFD-FL2	5,7E-08 *	8,3E-15 *	1,2E-13 *
PFA-FL1	3,1E-09 *	4,1E-07 *	0,0023 *
PFA-FL2	1,0E-06 *	2,5E-08 *	5,8E-07 *
FL1 - FL2	0,7938	0,9836	0,2998

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: (\*) –Diferença significativa; AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Os valores abaixo de 0,05 denotam a presença de diferença significativa entre os grupos de dados comparados, assim torna-se possível confirmar a equidade do efeito dos FL1 e FL2 em cada carreira de filtração, observa-se também uma menor presença de diferença significativa entre os dados de pH nas primeiras etapas do sistema FIME uma vez que observamos dados semelhantes no PFD-PFA em C1, AS-PFA em C2 e AS-PFD e AS-PFA em C3.

Quando comparado os dados AS-PFD observa-se que só não houve diferença significativa em C3, já a presença de diferença significativa no AS-PFD em C2 pode ser relacionada a adição da solução coagulante de Sulfato de alumínio na água que segundo Di Bernardo, (2005) sofre reações de hidrólise liberando prótons  $H_3O^+$  contribuindo para a diminuição do pH na água.

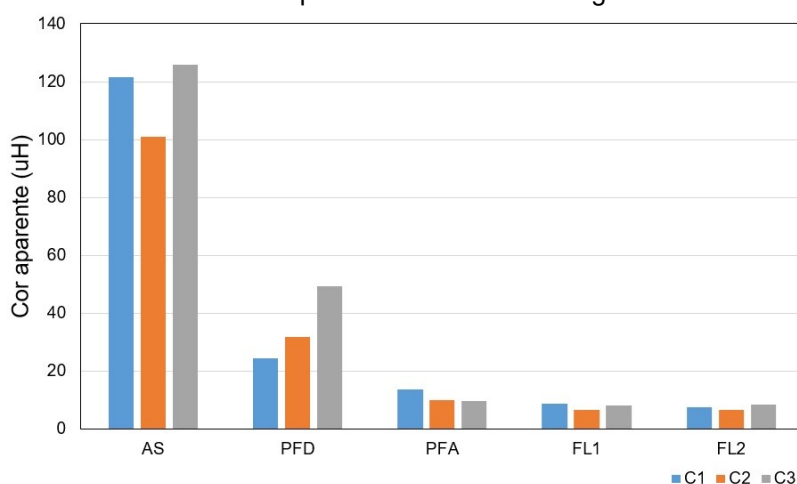
O argilo-mineral caulinita utilizado para a produção de AS possui cerca de 72,53% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) segundo o seu certificado de qualidade disponibilizado pelo comerciante. Esta composição pode explicar a elevação do pH ao longo das etapas de tratamento pois segundo Gomes, Furtado e Souza (2018) a sílica quando solubilizada em água se apresenta como ácido monossilícico  $\text{Si}(\text{OH})_4$  capaz de liberar íons  $\text{H}^+$  reduzindo o pH do meio, deste modo as etapas iniciais onde há maior presença de caulinita na água possuem maior fator de redução de pH, já nas etapas finais onde já houve retenção de boa parte da caulinita presente na água nos meios filtrantes o pH aumentou sem a influência da caulinita no meio.

Segundo Brasil (2021), através da Portaria GM/MS nº 888, emitida pelo Ministério da Saúde, subintende-se em seu ANEXO 3 (que trata sobre o tempo de contato mínimo para desinfecção) que a faixa de pH aceitável é de 6,0 a 9,0, faixa esta respeitada por 99,8% dos valores registrados em todas as carreiras de filtração, vale ainda ressaltar que em 98,6% das amostras foram registrados valores acima de 6,5 e não houve amostras com valores acima de 8,0.

#### 4.6 COR APARENTE

Os valores médios do parâmetro cor aparente observados durante as carreiras de filtração são representados na FIGURA 15, onde é possível observar um comportamento de redução do parâmetro ao decorrer das etapas do tratamento.

FIGURA 15 – Valores médios da cor aparente coletados ao longo das três carreiras de filtração.



FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

A TABELA 9 apresenta as médias de cor aparente coletadas ao longo das etapas do sistema em cada uma das três carreiras de filtração, assim como seus respectivos intervalos de confiança, dados que comprovam a menor variabilidade dos valores a medida que se avança nas etapas de tratamento.

TABELA 9 – Médias de cor aparente (uH) registradas durante as carreiras de filtração.

Etapas do tratamento	C1	C2	C3
AS	121,43 ± 13,64	100,96 ± 12,05	125,73 ± 14,61
PFD	24,61 ± 6,16	31,91 ± 7,65	49,45 ± 5,38
PFA	13,70 ± 2,73	10,10 ± 1,65	9,86 ± 1,34
FL1	8,79 ± 1,51	6,59 ± 0,94	8,29 ± 0,67
FL2	7,43 ± 1,57	6,59 ± 1,00	8,54 ± 1,05

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

A média de cor aparente de 100,96uH presente na AS utilizada para abastecimento de C2, menor na comparação com as médias de 121,43 e 125,75uH registradas na AS utilizada para abastecimento das C1 e C3, respectivamente, demonstra a interferência de sólidos suspensos na leitura do parâmetro durante a análise das amostras uma vez que pela TABELA 20 observa-se dados indicando menor presença de sólidos dissolvidos em C1.

Segundo Brasil (2021) através da Portaria GM/MS nº 888, o valor máximo permitido de cor aparente em águas para consumo humano após o tratamento convencional é de 15uH, limite respeitado por todas as médias de cor aparente observadas após a passagem pelos FLs considerando ainda os intervalos de confiança de cada um. Tal limite não foi superado nem mesmo pelo maior valor diário observado durante as três carreiras de filtração que foi 11,24uH.

Na TABELA 10 são apresentados os dados de eficiência de remoção de cor aparente registradas em cada etapa de filtração do sistema FiME durante as três carreiras executadas.

TABELA 10 – Eficiência de remoção de cor aparente (%) durante as carreiras de filtração.

Etapas do tratamento	C1	C2	C3
PFD	79,97 ± 3,26	67,37 ± 7,22	59,23 ± 5,98
PFA	43,01 ± 9,09	61,11 ± 8,39	79,21 ± 3,85
FL1	35,56 ± 3,21	31,60 ± 8,10	12,50 ± 8,47
FL2	45,74 ± 6,24	30,38 ± 11,27	10,95 ± 10,42

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

A carga extra de material em suspensão adicionada a C3 pelo uso da solução coagulante de *Moringa oleifera* demonstrada através dos resultados apresentados nos parâmetros de condutividade elétrica e sólidos totais pode ter contribuído para a menor eficiência de remoção apresentada pelo PFD de 59,23% quando comparada a 79,97 e 67,37% observados em C1 e C2, respectivamente.

Mesmo com essa redução estes valores se encontram muito acima dos reportados por Medeiros et al. (2020) que no tratamento de uma água com 338uH de cor aparente observaram eficiências de remoção de 10,3% em seu pré-filtro dinâmico.

As eficiências de remoção de cor aparente registradas pelos FLs nas três carreiras de filtração, 35,56% no FL1 e 45,74% no FL2 em C1, 31,60% no FL1 e 30,38% no FL2 em C2 e 12,50% no FL1 e 10,95% no FL2 em C3 se encontram bem abaixo de eficiências registradas por Freitas et al. (2021) em seu estudo com filtros lentos que registraram eficiências de remoção próximas a 73,78%, mas deve-se atentar para os níveis de cor aparente de entrada e saída de cada filtro, enquanto o autor acima registra uma média de entrada de 61,4uH, a TABELA 9 demonstra que a maior média de cor aparente na entrada dos FLs foi 13,70uH em C1, valor quase cinco vezes menor.

Na Tabela 11 são apresentados os valores de eficiência de remoção de cor aparente acumulativa durante as etapas de filtração, nela observa-se que os valores de remoção somados do pré tratamento PFD+PFA em C1, 89,4%, são superiores aos registrados por Franco (2010) onde em carreira de filtração com ausência de adição de coagulantes registrou 65,77% de remoção.

TABELA 11 – Eficiência de remoção de cor aparente (%) acumulativa durante as carreiras de filtração.

Etapas do tratamento	C1	C2	C3
PFD	78,43 ± 3,26	67,37 ± 7,22	59,23 ± 5,98
PFD+PFA	89,40 ± 1,05	89,62 ± 1,62	91,83 ± 1,37
PFD+PFA+FL1	92,82 ± 0,44	93,11 ± 1,13	93,10 ± 0,94
PFD+PFA+FL2	93,51 ± 0,69	92,96 ± 1,32	92,85 ± 1,33

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

No pré-tratamento realizado em C3 observa-se eficiência de remoção de cor aparente de 91,83%, valor este superior ao registrado por Franco (2010) no pré-tratamento de uma carreira onde também houve a adição do coagulante *Moringa oleifera*, e registrou eficiência de até 82,59%

Em se tratando da eficiência do tratamento completo observa-se que todas as carreiras apresentaram eficiência de remoção de cor aparente acima dos 90%, valores superiores aos apresentados por Freitas et al. (2021) que registraram eficiências de 79,70% em seu estudo utilizando apenas decantação e filtros lentos. As eficiências registradas nesta pesquisa também foram superiores as apresentadas por Medeiros et al.(2020) que cita valores de 15,38% de eficiência de remoção em pré-filtros dinâmicos somados a filtros lentos.

Franco (2010) apresenta valores semelhantes nas eficiências de remoção de cor aparente observadas quando não realizado a adição de solução coagulante com mínimo de 89,18% e máximo de 97,37%, já quando adicionado solução coagulante de *Moringa oleifera* os valores registrados pela autora se estabelecem em uma faixa de 95,98 a 98,36%, valores superiores aos registrados na TABELA 11 durante C3 onde também houve adição do coagulante *Moringa oleifera* e observa-se 93,10% no FL1 e 92,85% no FL2.

A análise de variância ANOVA de um fator foi aplicada de modo a ser realizada a comparação de cada etapa de filtração entre as três carreiras de filtração, assim realizou-se uma ANOVA para os PFDs, uma para os PFAs e uma para os FLs.

Os Valor-P encontrado nas ANOVAs dos PFDs e dos FLs se mantiveram acima do valor de 0,05 estipulado a partir do intervalo de confiança, o que caracteriza

hipótese nula para a presença de diferença significativa entre os conjuntos de dados tornando possível afirmar que estes são estatisticamente iguais. A análise de variância ANOVA desenvolvida para a comparação dos PFAs demonstrou a presença de diferença significativa entre os conjuntos de dados uma vez que o Valor-P se manteve abaixo de 0,05, assim foi realizado o teste de Tukey presente na TABELA 12 de modo a identificar entre quais grupo houve a presença de diferença significativa.

TABELA 12 – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro cor aparente no PFA.

Comparação entre os PFA	
C1-C2	0,8006
C1-C3	0,0030 *
C2-C3	0,0156 *

Fonte: Autoria própria (2021).

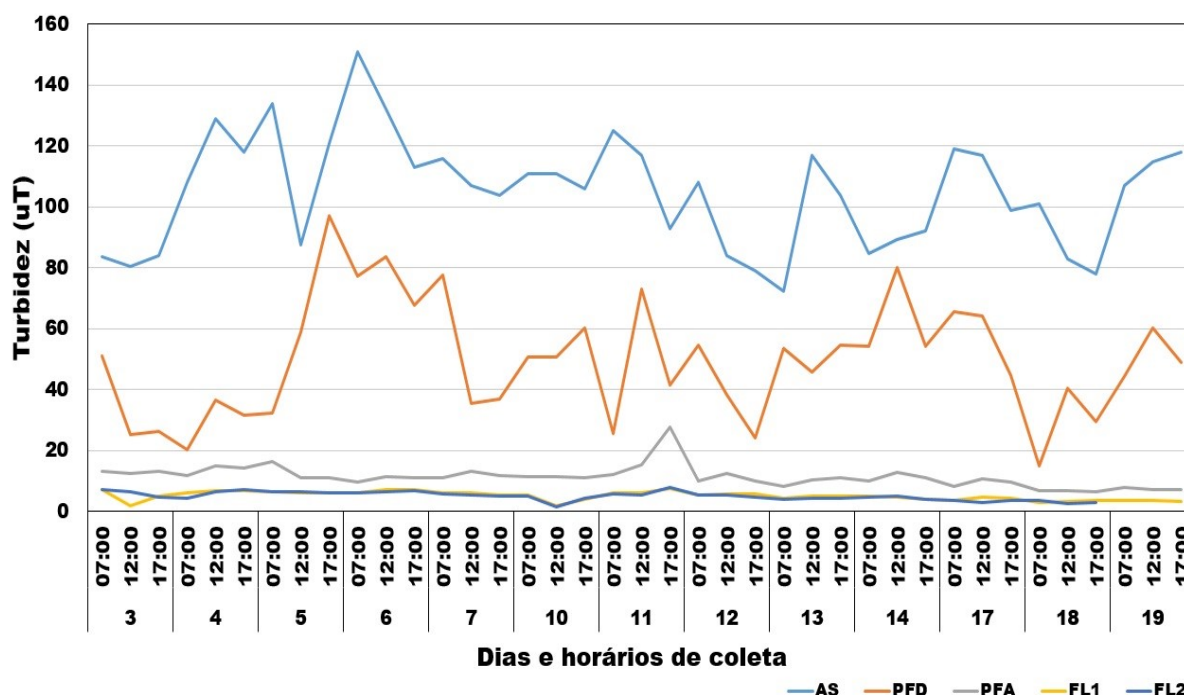
LEGENDA: (\*) –Diferença significativa; PFA – Pré-filtro pedregulho; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

O teste de Tukey demonstrou a presença de diferença significativa apenas quando comparado C3 com as demais. A TABELA 10 registra maior valor de eficiência de remoção de cor aparente na etapa de PFA durante C3, e considerando que a única diferença entre as três carreiras de filtração até a etapa de PFA foi a adição ou não de coagulantes, pode-se afirmar que ocorreu uma maior eficiência na etapa de PFA durante C3 devido ao emprego da solução coagulante *Moringa oleifera*.

#### 4.7 TURBIDEZ

O valores de turbidez obtidos ao longo do ensaio para C1, representados pela FIGURA 16, demonstram uma variação dos valores apresentados pela AS empregada no tratamento, uma vez que estes apresentaram valor mínimo em 72,2uT e valor máximo em 151,0uT. Houve também uma variabilidade considerável dos valores da água após a passagem pelo PFD onde o valor mínimo foi de 14,9uT e o valor máximo foi 97,1uT.

FIGURA 16 – Valores de turbidez coletados ao longo da primeira carreira de filtração.



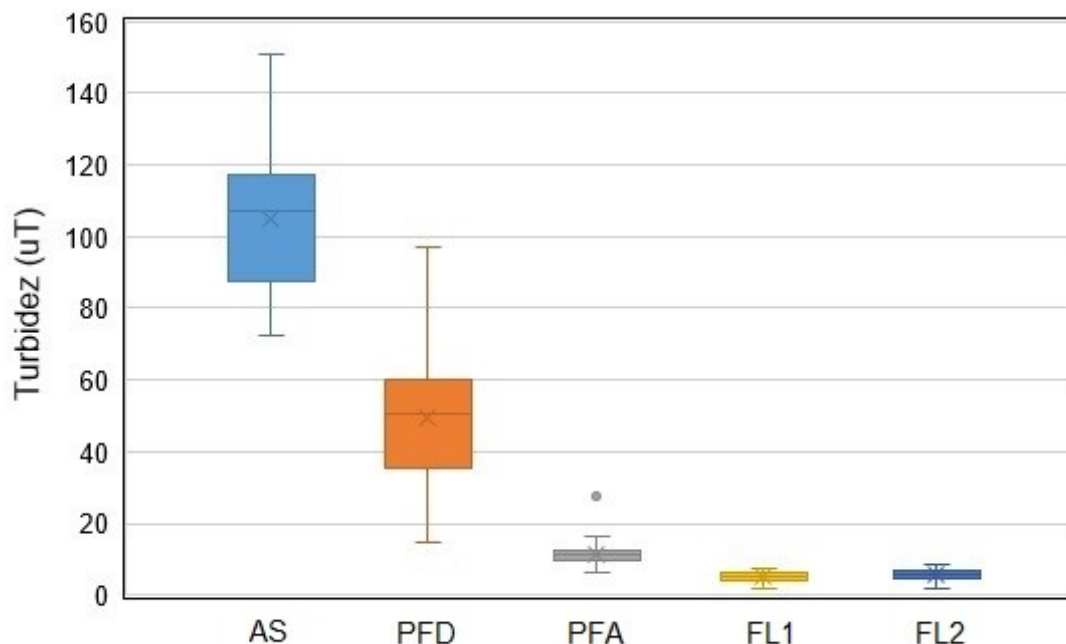
FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2.

Observa-se ainda no gráfico apresentado pela FIGURA 16 que após a passagem pelo PFA os valores de turbidez apresentaram menor variação, valores máximos e mínimos de 6 21,7 e 6,4uT, respectivamente, e um comportamento levemente decrescente ao decorrer do tempo que também pode ser observado pela diferença entre a média dos primeiros cinco dias de 12,4uT e a média dos últimos cinco dias de 8,9uT. Já após a passagem pelas unidades paralelas de FLs, 1 e 2, registrou-se um comportamento semelhante em se tratando dos valores de turbidez mesmo o FL2 sendo encerrado antes do FL1.

Essas variações podem ser melhor observadas nos gráficos boxplot representados na FIGURA 17, onde os diagramas de caixa da AS e do PFD apresentam perfis mais alongados indicando a maior variação entre os pontos de turbidez, porém, mesmo que a maior variação de turbidez se encontre na AS e no PFD, apenas no PFA há a presença de outliers indicando um ponto discrepante.

FIGURA 17 – Representação em boxplot dos valores de turbidez coletados nas etapas do sistema durante a primeira carreira de filtração.



FONTE: Autoria própria (2021).

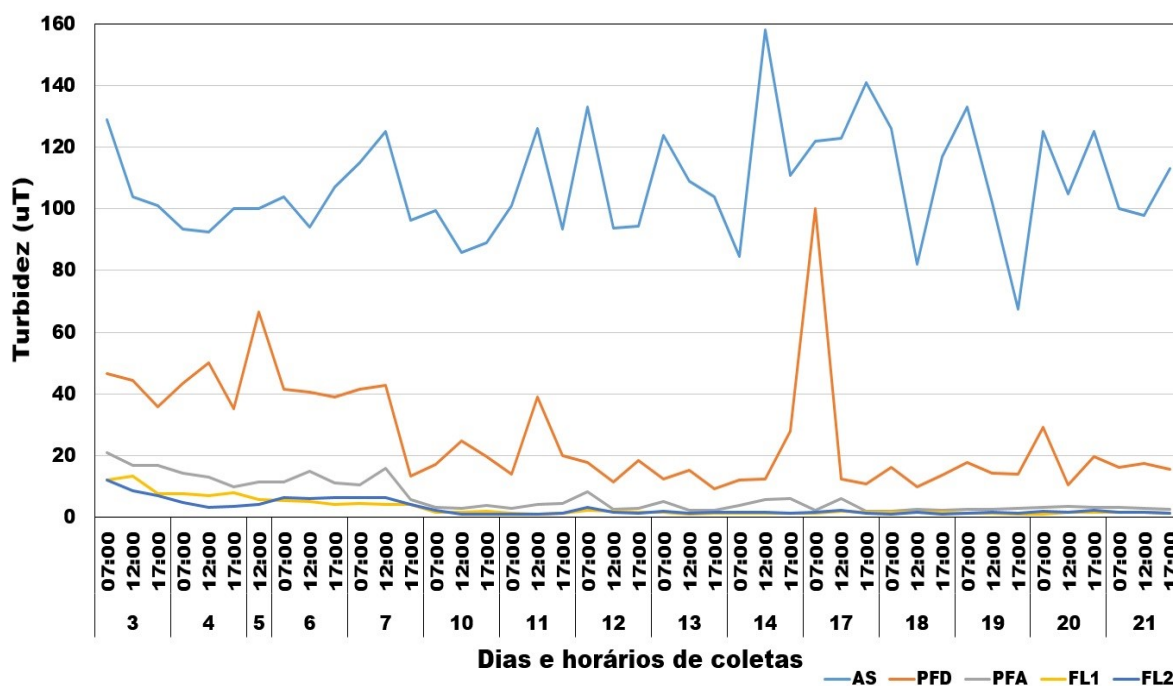
LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2.

Segundo Brasil (2021) através da Portaria GM/MS nº 888, o valor máximo permitido de turbidez para águas pós filtração lenta é de 1,0uT em no mínimo 95% das amostras e 2,0uT para as demais, valores estes não alcançados durante C1, onde os valores mínimos observados foram 1,76uT no FL1 e 1,46uT no FL2. Apenas 5,1% das amostras se mantiveram abaixo de 2,0uT no FL1, e apenas 2,8% das amostras se mantiveram abaixo de 2,0uT durante toda a C1.

Na FIGURA 18 são representados os valores de turbidez registrados ao longo de C2 e novamente observa-se maiores variações de turbidez na AS utilizada para o abastecimento do sistema, com valores máximos e mínimos de 158,0 e 67,6uT, respectivamente, já após a passagem pelo PFD houve menor variação dos dados quando comparado a C1 por exemplo, onde houve ainda redução nos valores após a passagem pelo PFD ao decorrer do tempo como pode ser observado pela diferença entre a média dos primeiros cinco dias de 41,5uT e a média dos últimos cinco dias de 15,5uT.



FIGURA 18 – Valores de turbidez coletados ao longo da segunda carreira de filtração.



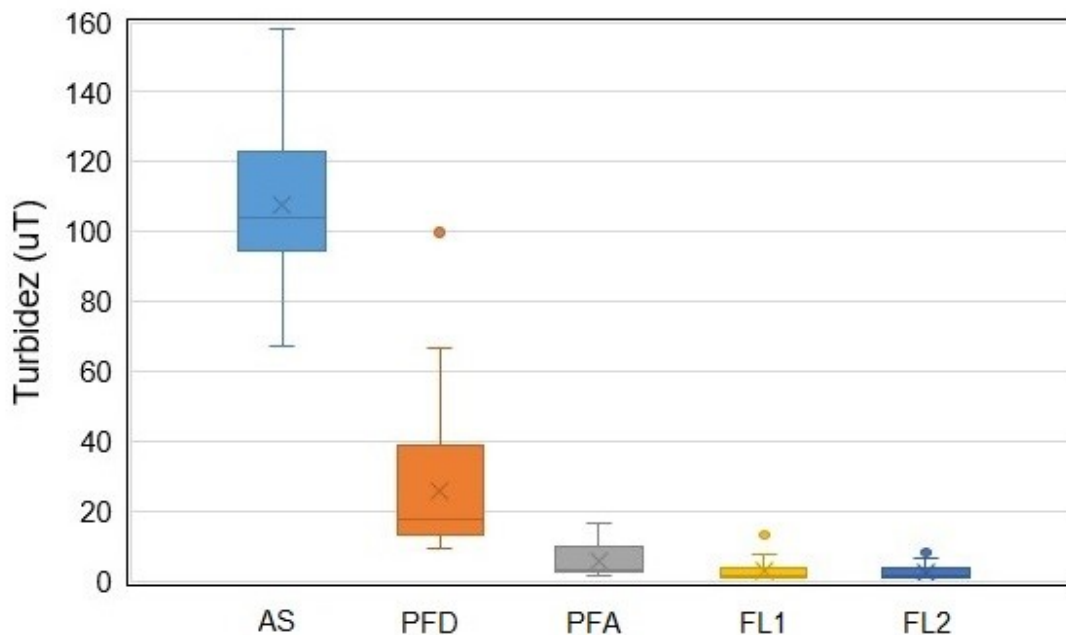
FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2.

O comportamento decrescente no valor de turbidez ao decorrer do tempo nas etapas PFA, FL1 e FL2 também podem ser observados no gráfico apresentado na FIGURA 18, com média nos primeiros cinco dias de 13,2; 6,7 e 6,0uT respectivamente, e nos últimos cinco dias de 2,8; 1,4 e 1,5uT, respectivamente. Os valores de turbidez apresentados pós PFA foram reduzidos de tal maneira que se aproximaram dos valores apresentados pelos filtros lentos FL1 e FL2, estes últimos apresentando valores próximos entre si durante todo o ensaio.

O gráfico boxplot representado na FIGURA 19 permite observar uma menor amplitude nos primeiro e segundo quartis dos diagramas de caixa o que indica que a medida que o valores de turbidez são reduzidos, não só entre as etapas, mas ao decorrer do tempo, a variabilidade de turbidez também é reduzida.

FIGURA 19 – Representação em boxplot dos valores de turbidez coletados nas etapas do sistema durante a segunda carreira de filtração.



FONTE: Autoria própria (2021).

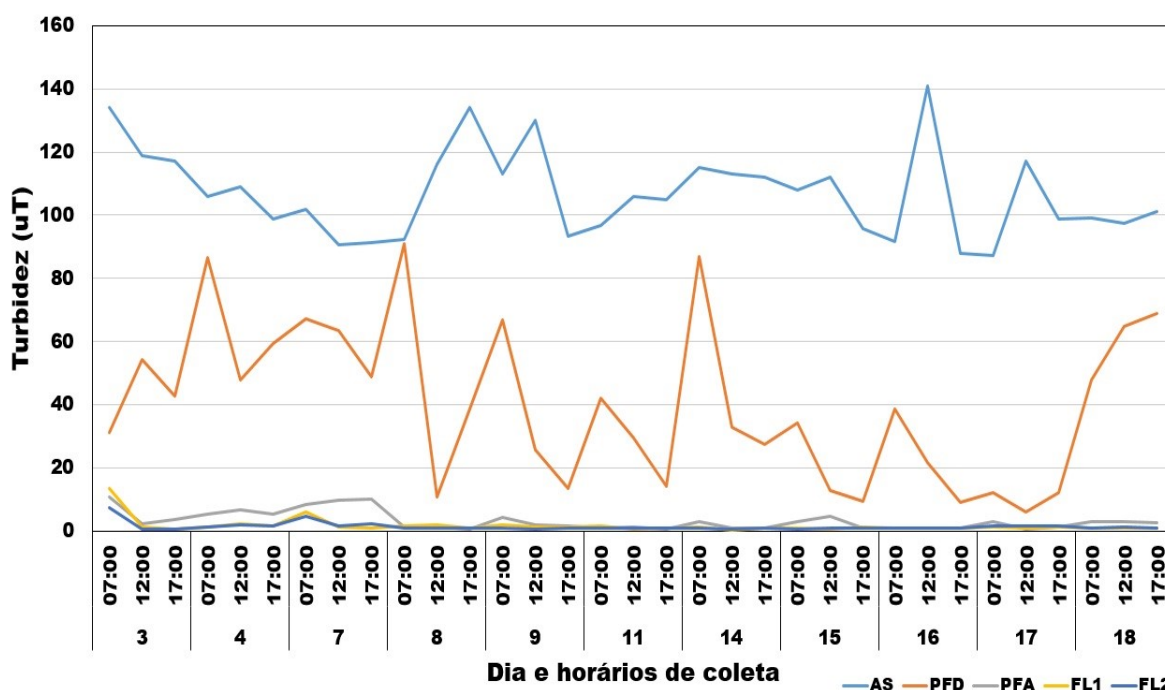
LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2.

O valor mínimos de turbidez encontrado durante C2 no FL1 foi de 1,02uT, portanto todos os valores finais de turbidez deste filtro estiveram acima do valor máximo de 1,0uT permitido por Brasil (2021) através da Portaria GM/MS nº 888. Já no FL2 apenas 2,3% das amostras se mantiveram abaixo do valor máximo permitido pela legislação. Sanchez et al. (2012) aplicando o coagulante Sulfato de alumínio em seu sistema FiME encontrou melhores eficiências de remoção o que resultou em valores abaixo de 1,0uT em 98% das amostras coletadas.

. No entanto, observa-se uma superioridade da C2 em relação a C1 uma vez que 67,5% das amostras se mantiveram abaixo de 2,0uT no FL1, e 60,5% no FL2, comparado aos 5,1 e 2,8% referentes a estes mesmos filtros em C1.

Nos valores coletados durante C3, representados na FIGURA 20 também é possível observar a viação dos valores de turbidez de entrada pela AS, com máximo e mínimo de 141,0 e 87,4uT, porém os valores de turbidez após a passagem pelo PFD se diferem do comportamento apresentado em C2, sendo que há uma grande faixa de variação com máximo e mínimo de 91,1 e 5,9uT, a maior entre as três carreiras de filtração.

FIGURA 20 – Valores de turbidez coletados ao longo da terceira carreira de filtração.



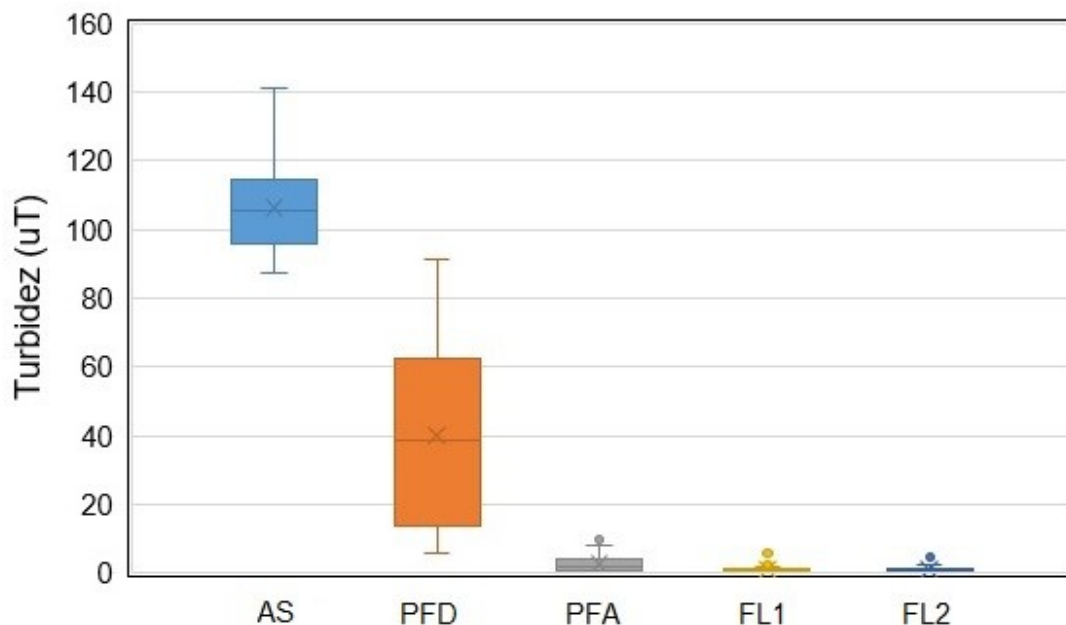
FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2.

Os valores de turbidez após a passagem pelo PFA sofrem redução após a primeira semana de funcionamento como evidencia a diferença entre a média dos primeiros cinco dias de 6,9uT e a média dos últimos cinco dias de 1,7uT. A etapa de filtração lenta representada pelos FL1 e FL2, assim como nas duas carreiras de filtração anteriores, apresentaram comportamento similar dos valores de turbidez final mesmo posicionadas em paralelo e com diferenças na composição da sua camada suporte.

Observa-se através do gráfico boxplot representado pela FIGURA 21 novamente a alta variabilidade dos dados de turbidez após a passagem pelo PFD, essa variabilidade foi amortizada após a passagem pelo PFA, e pode-se observar que ambos FL1 e FL2 apresentam em seus diagramas de caixa a menor amplitude dentre todos os tratamentos, indicando maiores valores de eficiência de remoção do parâmetro e maior estabilidade nos dados.

FIGURA 21 – Representação em boxplot dos valores de turbidez coletados nas etapas do sistema durante a terceira carreira de filtração.



FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2.

Durante C3 42,4% das amostras coletadas na saída do FL1 e 45,4% das amostras coletadas na saída do FL2 se mantiveram abaixo do valor máximo permitido por legislação de 1,0uT, segundo Brasil (2021) através da Portaria GM/MS nº 888, estes índices são também são menores que o mínimo de 95% exigido. Este resultados demonstram que dentre as três carreiras de filtração C3 apresenta os melhores resultados em se tratando da exigência prevista por lei, primeiro por apresentar os melhores índices quanto a valores abaixo do valor máximo permitido de 1,0uT e também por apresentar 90,9 e 87,8% de valores de turbidez abaixo de 2,0uT nos FL1 e FL2 respectivamente.

Os dados médios de turbidez durante as etapas de tratamento nas três carreiras de filtração representados pela TABELA 13 demonstram que as médias de turbidez presente na AS em cada uma das carreiras de filtração se mantiveram próximo ao valor de 100uT estipulado pela metodologia. Dentre os valores médios observados na TABELA 13 destaca-se o menor valor de turbidez na etapa de PFD de 26,25uT em C2, e os menores valores médios ao final do tratamento completo em C3, 1,65uT no FL1 e 1,39uT no FL2.

TABELA 13 – Média de turbidez (uT) durante as etapas de tratamento das carreiras de filtração.

Etapas do tratamento	C1	C2	C3
AS	105,11 ± 5,62	108,08 ± 5,25	107,01 ± 4,69
PFD	49,55 ± 5,94	26,25 ± 5,37	39,94 ± 8,35
PFA	11,37 ± 1,11	6,40 ± 1,53	3,19 ± 0,99
FL1	5,17 ± 0,46	3,07 ± 0,87	1,65 ± 0,77
FL2	5,08 ± 0,47	2,87 ± 0,73	1,39 ± 0,45

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

A TABELA 14 apresenta os valores médios de eficiência de remoção de turbidez para cada etapa de tratamento durante as três carreiras de tratamento.

TABELA 14 – Eficiência de remoção de turbidez (%) durante as carreiras de filtração.

Etapas do tratamento	C1	C2	C3
PFD	52,50 ± 5,32	75,35 ± 4,87	61,85 ± 8,41
PFA	72,78 ± 4,60	74,85 ± 3,48	90,44 ± 2,81
FL1	53,29 ± 3,38	50,27 ± 5,28	27,16 ± 16,09
FL2	55,71 ± 3,30	52,26 ± 4,40	33,49 ± 16,79

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

A eficiência de remoção de turbidez apresentada pelo PFD em C1 de 52,5% é corroborada pelos resultados de vários autores como Di Bernardo et al. (1999) que citam em seu estudo a eficiência média de remoção de turbidez esperada por uma etapa de PFD no tratamento de águas com altas turbidez de 45 a 50%. Tangerino et al. (2013) apresenta eficiências de remoção de turbidez de 42,1% desempenhada pelo PFD de seu trabalho com filtro em múltiplas etapas. Já os resultados de eficiência de remoção de turbidez encontrados por Medeiros et al. (2020) no seu PFD em escala domiciliar se mantiveram entre 50,7 e 53,6%.

Observando a TABELA 14, o maior valor de eficiência de remoção de turbidez após a passagem pelo PFD, de 75,3% encontrado em C2 onde houve a aplicação do coagulante Sulfato de alumínio a montante deste ponto, pode ser relacionada a aplicação desta solução coagulante.

Sanchez et al. (2012) realizou experimento similar com aplicação do coagulante Sulfato de alumínio em seu sistema FIME, porém no ponto a montante do seu pré-filtro de pedregulho, registrando aumento de eficiência de remoção de turbidez de uma faixa de 21 a 76% para 85 a 96%.

O valor de eficiência de remoção de turbidez de 61,8%, encontrado em C3, maior que os valores encontrados em C1 e por Di Bernardo et al. (1999), Tangerino et al. (2013) e Medeiros et al. (2020), pode também ser atribuído a aplicação de solução coagulante, no caso a de *Moringa oleifera*. Franco (2010) também realizou a aplicação da *Moringa oleifera* apresentando um salto de eficiência na primeira etapa de filtração pós aplicação do coagulante de 50,4 para 80,4% de remoção de turbidez.

Para a etapa de PFA, Di Bernardo et al. (1999) cita em seu estudo uma eficiência média de remoção de turbidez esperada no tratamento de águas com altas turbidez de 50 a 80% faixa de valores condizentes com os encontrados em C1; onde houve ausência da aplicação de coagulantes e os valores de eficiência de remoção de turbidez atingiram uma média de 72,78%.

Em C2 onde houve a aplicação do coagulante Sulfato de alumínio os valores atingiram 74,85% de eficiência de remoção no PFA, porcentagem inferior a eficiência encontrada por Sanchez et al.(2012) que registraram 96% de eficiência de remoção em seu pré-filtro de pedregulho, em um tratamento onde também houve aplicação de Sulfato de alumínio. Já em C3 onde houve a aplicação de *Moringa oleifera* os valores registrados foram de 90,44%, superior a eficiência encontrada por Franco (2010) que registrou valor de 80,4% após aplicação de *Moringa oleifera* em seu pré-filtro de pedregulho.

Maciel e Sabogal-Paz (2018) registram em seu estudo eficiências de remoção de 85% com turbidez de entrada de 10uT em biofiltros de fluxo lento com formação de biofilme. Young-Rojanschi e Madramootoo (2014) também estudando biofiltros de fluxo lento com formação de biofilme encontraram eficiência de remoção de turbidez entre 87 e 96% com turbidez de entrada de 11,4uT.

Nas três carreiras de filtração desenvolvidas neste trabalho não houve a avaliação de formação de camada biofilme, não houve também a inserção de

microrganismos na produção de AS, assim atribui-se as eficiências de remoção dos FLs apenas ao processo de tratamento físico, onde com turbidez de entrada de 11,37uT houve eficiência de remoção de 53,29 e 55,71 nos filtros FL1 e FL2 respectivamente, durante C1, valores abaixo dos níveis encontrados pelos autores já citados acima.

Em C2, onde a turbidez média de entrada nos filtros lentos foi de 6,4uT as eficiências de remoção se estabeleceram em 50,27% no FL1 e 52,26% no FL2, valores similares as eficiências observadas em C1 e novamente abaixo do registro de outros estudos já citados. Já em C3 foram registrados eficiências ainda menores na remoção de turbidez, onde a média de entrada nos filtros lentos foi de 3,19uT e as eficiências no FL1 e FL2 foram de 27,16 e 33,49% respectivamente.

Esses valores de remoção se encontram abaixo também do estudo publicado por Freitas et al. (2021), onde em filtros lentos com a formação de biofilme e turbidez de entrada de 13,2uT as eficiências de remoção se estabeleceram nos níveis de 76,3 e 75%. Por sua vez, Medeiros et al. (2020), em um estudo com maiores similaridades aplicando um tratamento por sistema FIME, apresenta valores menores do que os encontrados durante as três carreiras de filtração realizadas, com turbidez de entrada nos filtros lentos de 18,1uT e eficiências de remoção de 23,2 e 26,0%.

A TABELA 15 apresenta a eficiência acumulativa de remoção de turbidez durante as carreiras de filtração, o que demonstra que mesmo quando houve eficiências mais baixas ou mais altas em etapas isoladas, durante o tratamento completo todas as três carreiras de filtração atingiram valores de eficiência acumulativa média superior a 95%.

TABELA 15 – Eficiência de remoção de turbidez (%) acumulativa durante as carreiras de filtração.

Etapas do tratamento	C1	C2	C3
PFD	52,50 ± 5,32	75,35 ± 4,87	61,85 ± 8,41
PFA	88,90 ± 1,25	93,96 ± 1,44	96,95 ± 0,97
FL1	95,00 ± 0,47	97,07 ± 0,83	98,50 ± 0,59
FL2	95,04 ± 0,51	97,31 ± 0,65	98,70 ± 0,37

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Mushila et al. (2016) em seu estudo avaliando a eficiência de sistemas FIME, registram eficiências acumulativas de remoção de turbidez de 95,33%, valores condizentes, se observarmos a TABELA 15, com os 95,00 e 95,04% encontrados em C1 deste estudo, onde não houve a adição de coagulantes.

Adicionando coagulante a base de *Moringa oleifera*, Franco (2010) registrou eficiências de remoção de turbidez do sistema FIME com tratamento completo pouco maiores em uma faixa de 95,98 a 98,69%, valores similares aos registrados em C3 deste estudo onde também houve a adição do coagulante *Moringa oleifera* e foram encontrados valores de 98,50% no FL1 e 98,70% no FL2.

Foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA de modo a realizar um comparativo do desempenho de cada etapa do sistema FIME entre as três carreiras de filtração desenvolvidas, onde foi respeitado um nível de confiança de 95%. Deste modo realizou-se a comparação entre os PFDs, entre os PFAs, e entre os FLs das três carreiras, onde não foi constatado hipótese nula para a ANOVA de nenhum dos grupos, estando todos os Valo-P abaixo de 0,05, denotando presença de diferença significativa entre uma ou mais comparações.

Fez-se então necessário a aplicação do teste de Tukey com significância de 5% de modo a encontrar entre quais grupos de dados havia a presença de diferença significativa. Na TABELA 16 estão representados as comparações entre os PFDs das três carreiras de filtração.

TABELA 16 – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez no PFD.

Comparação entre os PFD	
C1-C2	1,5E-4 *
C1-C3	0,1238
C2-C3	0,0662

Fonte: Autoria própria (2021).

LEGENDA: (\*) –Diferença significativa; PFD – Pré-filtro dinâmico; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Observa-se na TABELA 16 a presença de diferença significativa apenas quando comparado os dados de PFD entre C1 e C2, esta diferença significativa quando somada aos dados de eficiência de remoção na etapa de PFD presentes na TABELA 14 permite atribuir o título de melhor eficiência de remoção à C2, pois C3 mesmo que estatisticamente semelhante a C2, também se manteve semelhante a C1 na etapa de PFD.



Na TABELA 17 são apresentados os resultados do teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez na etapa de PFA entre as três carreiras de filtração.

TABELA 17 – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez no PFA.

Comparação entre os PFA	
C1-C2	0,8051
C1-C3	1,3E-8 *
C2-C3	2,2E-7 *

Fonte: Autoria própria (2021).

LEGENDA: (\*) – Diferença significativa; PFA – Pré-filtro pedregulho; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

No comparativo apresentado pela TABELA 17 os dados de PFA de C3 se apresentam significativamente diferente de C1 e C2, enquanto estas últimas permanecem estatisticamente semelhantes entre si, deste modo, tomando os dados de eficiência de remoção proporcionada pelo filtro PFA apresentados na TABELA 14, pode-se afirmar que C3 apresentou os melhores resultados de eficiência de remoção do parâmetro turbidez na etapa de PFA.

Os destaques para C2 na etapa de PFD e para C3 na etapa de PFA demonstram a eficiência adicionada ao sistema pelo emprego dos coagulantes nestas carreiras de filtração se comparadas a C1 onde não houve adição de coagulantes.

Os resultados do teste de Tukey com significância de 5% aplicado para o parâmetro turbidez na etapa de FL entre as três carreiras de filtração são apresentados na TABELA 18.

TABELA 18 – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez nos FLs.

Tratamentos	FL1C1	FL2C1	FL1C2	FL2C2	FL1C3	FL2C3
FL1C1	-	0,9999	0,9928	1,0000	0,0053 *	0,0716
FL2C1	-	-	0,9634	0,9999	0,0022 *	0,0363 *
FL1C2	-	-	-	0,9915	0,0325 *	0,2560
FL2C2	-	-	-	-	0,0049 *	0,0680
FL1C3	-	-	-	-	-	0,9554
FL2C3	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2021).

LEGENDA: (\*) – Diferença significativa; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Entre os dados apresentados na TABELA 18 é possível observar que as diferenças significativas ocorreram majoritariamente quando houve a comparação entre os resultados observados no FL1 durante C3 com os demais tratamentos, desta maneira, observando também os dados de eficiência de remoção por etapas de filtração presentes na TABELA 14, pode-se afirmar que o FL1 de C3 apresentou resultados estatisticamente inferiores aos demais tratamentos que se estabeleceram igualmente eficientes para a remoção de turbidez.

Aplicou-se também a análise estatística de variância ANOVA fator único aos dados de eficiência do tratamento completo observados durante as três carreiras de filtração. Para a realização desta análise separou-se os dados em tratamentos (T), cada tratamento apresentava as eficiências somadas das etapas de PFD, PFA e FL, como cada carreira possuía dois tipos de FLs, foi gerado dois tratamentos (T1 para FL1 e T2 para FL2) por cada carreira (C1, C2 e C3).

A análise estatística de variância ANOVA fator único foi aplicada com nível de confiança de 95% onde não apresentou a constatação de hipótese nula, com o Valor P permanecendo abaixo de 0,05. Portanto foi necessário a aplicação do teste de Tukey com resultados apresentados na TABELA 19.

TABELA 19 – Teste de Tukey com significância de 5% para o parâmetro turbidez nos tratamentos completos.

Tratamentos	T1C1	T2C1	T1C2	T2C2	T1C3	T2C3
T1C1	-	0,9993	0,0031 *	1,9E-4 *	1,2E-11 *	1,0E-12 *
T2C1	-	-	0,0100 *	7,5E-4 *	9,1E-11 *	8,4E-12
T1C2	-	-	-	0,9793	0,0017 *	3,5E-4 *
T2C2	-	-	-	-	0,0198 *	0,0053 *
T1C3	-	-	-	-	-	0,9986
T2C3	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2021).

LEGENDA: (\*) – Diferença significativa; T1 – Tratamento 1; T2 – Tratamento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Dentre as comparações apresentadas na TABELA 19 observa-se que todos os tratamentos apresentaram diferença significativa entre si com exceção das

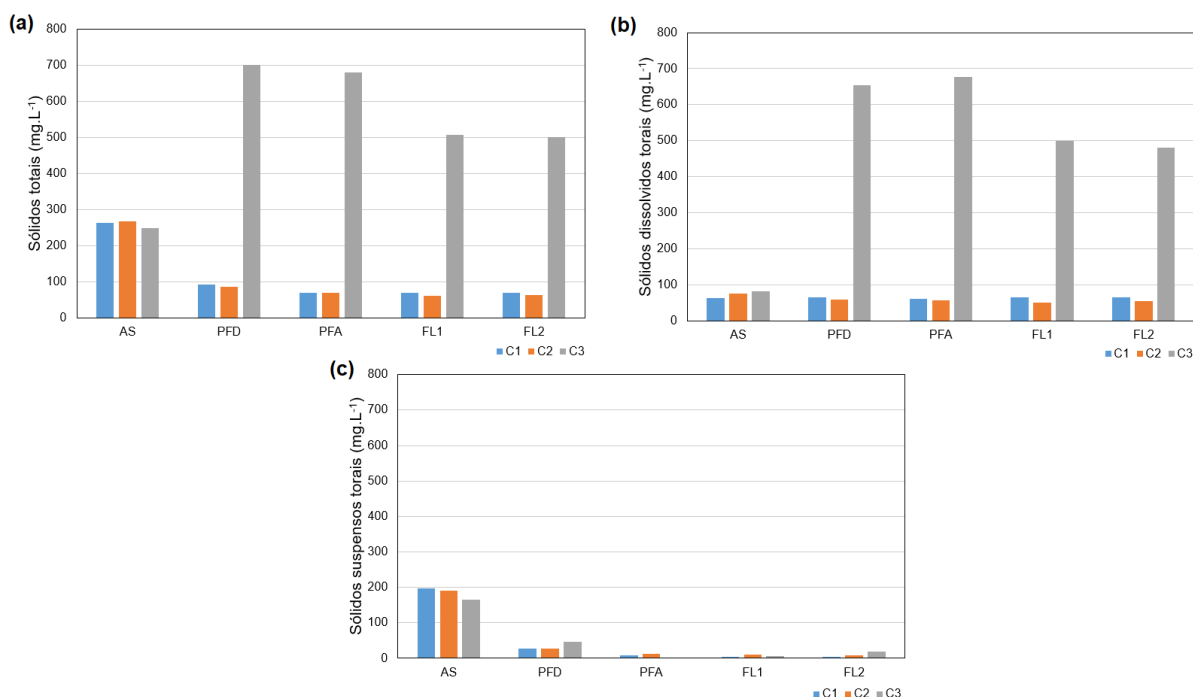
comparações entre os tratamentos realizados na mesma carreira de filtração que permaneceram estatisticamente semelhantes.

Assim, observando também os dados de médias de turbidez coletadas nas etapas do sistema FiME das três carreiras de filtração apresentados na TABELA 13 pode-se afirmar que, quando se avalia o tratamento completo, C3 onde houve o emprego do coagulante *Moringa oleifera*, apresentou estatisticamente as melhores eficiências de remoção, seguida por C2 onde houve o emprego do coagulante Sulfato de alumínio, e por último C1 onde não houve o emprego de coagulantes durante o tratamento.

#### 4.8 SÓLIDOS TOTAIS, SÓLIDOS DISSOLVIDOS TOTAIS E SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

A FIGURA 22 apresenta o comportamento dos valores médios de sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais registrados durante as carreiras de filtração.

FIGURA 22 – Valores médios de sólidos registrados ao longo das três carreiras de filtração.



FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Através da FIGURA 22 fica possível observar comportamentos resultados das características próprias das diferentes carreiras de filtração como o aumento na concentração de sólidos totais em C3 no instante após a aplicação da solução coagulante *Moringa oleifera*, observa-se também que ocorreu uma redução substancial dos sólidos suspensos durante o tratamento ao passo que os sólidos dissolvidos permaneceram visualmente estáveis com exceção do comportamento já citado em C3.

Os resultados dos valores médios de sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais demonstrados graficamente na FIGURA 22 são registrados numericamente na TABELA 20, onde novamente fica claro a eficiência maior na remoção de sólidos suspensos presentes na água com redução substancial já no momento após a passagem pelo PFD.

TABELA 20 – Médias de sólidos registradas durante as carreiras de filtração.

Carreira de filtração	Parâmetro	Etapas do sistema FIME				
		AS	PFD	PFA	FL1	FL2
C1	Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	262,22 ± 44,04	94,44 ± 11,76	70,22 ± 7,42	69,11 ± 6,47	69,33 ± 7,26
	Sólidos dissolvidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	64,39 ± 6,38	65,06 ± 3,97	61,57 ± 1,29	65,68 ± 14,17	65,21 ± 4,04
	Sólidos suspensos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	197,82 ± 60,17	27,38 ± 5,85	8,65 ± 4,37	3,43 ± 1,63	4,12 ± 2,82
C2	Sólidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	267,10 ± 75,69	86,17 ± 18,53	69,83 ± 6,51	61,50 ± 6,67	63,17 ± 7,95
	Sólidos dissolvidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	75,66 ± 8,56	58,79 ± 4,12	57,76 ± 6,67	51,76 ± 24,10	55,49 ± 31,04
	Sólidos suspensos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	191,44 ± 29,70	27,38 ± 8,93	12,07 ± 17,55	9,74 ± 4,55	7,68 ± 3,49
C3	Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	249,10 ± 51,36	700,88 ± 340,97	678,89 ± 360,26	506,01 ± 610,20	500,69 ± 616,57
	Sólidos dissolvidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	82,68 ± 13,76	654,79 ± 317,68	676,03 ± 364,21	500,37 ± 591,57	480,67 ± 598,61
	Sólidos suspensos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	166,39 ± 138,72	46,08 ± 20,91	2,77 ± 1,28	5,61 ± 4,10	19,92 ± 38,88

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração.

Brasil (2021) através da Portaria GM/MS Nº 888 delimita valor máximo permitido através dos padrões organolépticos de potabilidade da água apenas para sólidos dissolvidos sendo este de 500mg.L<sup>-1</sup>, sabendo que os sólidos dissolvidos e os sólidos suspensos são frações dos sólidos totais, pode-se afirmar, através dos dados

demonstrados na TABELA 20, que estes três parâmetros se mantiveram abaixo no limite máximo exigido pela legislação, com exceção dos dados coletados após em C3 após a aplicação da solução coagulante de *Moringa oleifera*.

Durante C3 foi utilizado uma concentração de solução coagulante de *Moringa oleifera* de 80mg.L<sup>-1</sup> no tratamento da água sintética, o que resultou na redução dos valores apresentados por parâmetros como cor aparente e turbidez, porém a TABELA 20 demonstra que a carga de sólidos adicionada ao sistema pela aplicação do coagulante manteve o parâmetro sólidos dissolvidos em níveis elevados até após o final no processo de tratamento, indicando que a concentração de sólidos presente na solução coagulante possui potencial de prejudicar a qualidade final no tratamento de água.

Na TABELA 21 observa-se os dados médios de eficiência de remoção dos parâmetros sólidos totais, sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais registrados, comprovando a sensibilidade do parâmetro quando empregado a solução coagulante de *Moringa oleifera*.

TABELA 21 – Médias de eficiência de remoção de sólidos registradas durante as carreiras de filtração.

Parâmetro	Carreira de filtração	Tratamento completo	
		T1	T2
Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )		73,64 ± 6,64	73,56 ± 7,28
Sólidos dissolvidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	C1	-2,00 ± 14,35	-1,28 ± 10,07
Sólidos suspensos totais(mg.L <sup>-1</sup> )		98,26 ± 1,53	97,92 ± 2,74
Sólidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )		76,97 ± 10,38	76,35 ± 12,63
Sólidos dissolvidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	C2	31,59 ± 42,68	26,66 ± 50,17
Sólidos suspensos totais(mg.L <sup>-1</sup> )		94,91 ± 2,52	95,99 ± 2,56
Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )		-103,12 ± 238,67	-100,98 ± 214,46
Sólidos dissolvidos totais(mg.L <sup>-1</sup> )	C3	-505,14 ± 567,55	-481,32 ± 575,66
Sólidos suspensos totais(mg.L <sup>-1</sup> )		96,64 ± 5,83	88,01 ± 8,85

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: AS – Água sintética; PFD – Pré-filtro dinâmico; PFA – Pré-filtro pedregulho; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2; C1 – Primeira carreira de filtração; C2 – Segunda carreira de filtração; C3 – Terceira carreira de filtração; T1 – Tratamento 1; T2 – Tratamento 2.

Os valores de eficiência de remoção de sólidos totais em C1 e C2 superaram 70%, o que não ocorreu em C2 devido a carga de sólidos adicionada pela solução coagulante empregada de *Moringa oleifera*. Em nenhum dos tratamentos houve

eficiência de remoção de sólidos dissolvidos totais relevante, uma vez que os dados de 31,59% no tratamento T1C2 e 26,66% no tratamento T2C2 foram prejudicados pelo alto intervalo de confiança superior as médias de eficiência, de 42,68 e 50,17, respectivamente.

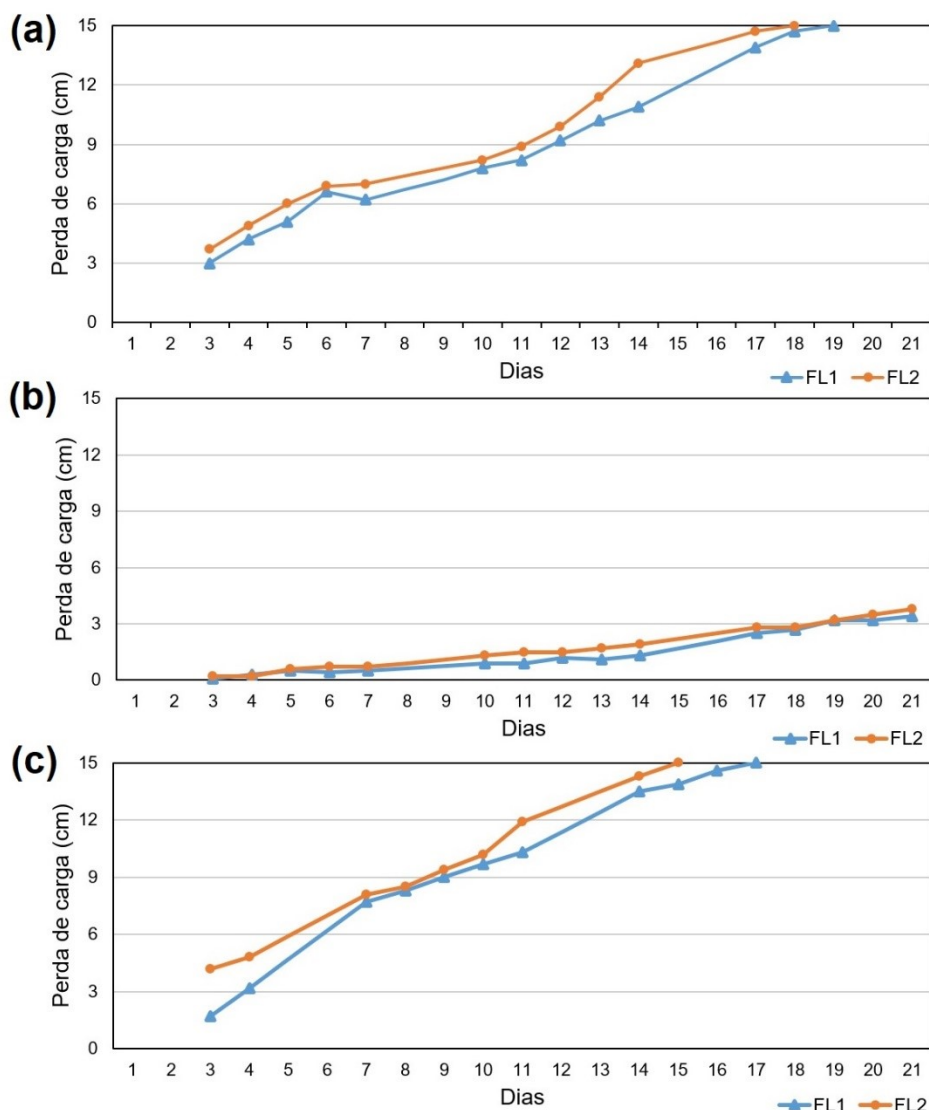
Através da TABELA 21 pode-se observar que, com exceção do tratamento T2C3 que apresentou 88,01% de eficiência de remoção de sólidos suspensos totais, todos os demais tratamentos apresentaram eficiência de remoção superior a 95%. Estes valores de remoção de sólidos suspensos totais são corroborados por Mushila et al, (2016) que registraram 98,2% de eficiência de remoção em seu sistema de filtração em múltiplas etapas e por Tangerino et al, (2013) que apresentaram valores na ordem de 97% de eficiência de remoção.

Aplicou-se a análise estatística de variância ANOVA fator único, de modo a comparar as eficiências de remoção de sólidos totais, sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais entre as três carreiras de filtração. Respeitando um nível de confiança de 95%, constatou-se a hipótese nula para a ANOVA de todas as comparações entre os grupos, estando todos os Valo-P acima de 0,05, indicando portando que os dados de eficiência são estatisticamente semelhantes, mesmos os valores discrepantes observados nas eficiências de remoção de sólidos totais e sólidos dissolvidos totais em C3, isto influenciado pela alta variabilidade dos dados que resultou em um intervalo de confiança alto.

#### 4.9 PERDA DE CARGA

Observando os valores de perda de carga coletados durante as três carreiras de filtração e representados na FIGURA 23, apenas C2 perdurou durante os 21 dias estabelecidos para a análise de cada carreira, apresentando valores finais de perda de carga de 3,4 cm no FL1 e 3,8 cm no FL2 no dia 21. Ambas C1 e C3 atingiram o valor máximo de perda de carga de 15cm antes do dia 21, sendo C1 encerrada dia 19 no FL1 e dia 18 no FL2, e C3 encerrada dia 17 no FL1 e dia 15 no FL2.

FIGURA 23 – Perda de carga nos filtros lentos durante as carreiras de filtração.



FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: (a) Primeira carreira de filtração; (b) Segunda carreira de filtração; (c) Segunda carreira de filtração; FL1 – Filtro lento 1; FL2 – Filtro lento 2.

Nos filtros lentos do seu sistema FIME, Mushila et al. (2016) registrou níveis de perda de carga em 20 dias próximos a 5cm, somente após 37 dias foram registrados níveis de perda de carga próximos a 15cm, porém vale ressaltar que a turbidez da água tratada em seu estudo permaneceu abaixo de 50uT nos primeiros 30 dias de funcionamento do sistema. Freitas et al. (2021) registrou carreiras de filtração de 28 e 29 dias de funcionamento antes de atingir a perda de carga máxima no sistema e ser necessário a lavagem nos meios filtrantes e a turbidez de entrada nos filtros lentos permaneceu em uma média de 13,2uT.

Ambos os autores registraram carreiras de filtração mais longas que C1 e C3 estudadas neste experimento devido a formação da camada de biofilme também chamada de “schmutzdecke”, uma vez que a concentração de atividade biológica na superfície do filtro lento permite maiores valores de remoção matéria orgânica o que pode refletir na durabilidade das carreiras (NI' MATUZAHROH et al., 2020; DI BERNARDO et al., 1999; CHAN et al., 2018).

O sucesso na longevidade de C2 pode ser atribuído a fatores como média de turbidez de entrada baixa de 6,4uT em comparação a de 11,37uT em C1, e carga de sólidos de entrada nos filtros lentos mais baixas que as outras carreiras 69,8 mg.L<sup>-1</sup> nos FL1 e FL2, em comparação a 678,9 mg.L<sup>-1</sup> nos FL1 e FL2 durante C3.

Observando o comportamento de perda de carga das três carreiras de filtração fica claramente perceptível que a adição do coagulante a base de *Moringa oleifera* influenciou diretamente a redução da longevidade de C3. A média de parâmetros como condutividade elétrica (896,79 $\mu$ S.cm<sup>-1</sup>) e sólidos totais (678,9mg.L<sup>-1</sup>) registrados após a passagem pelo PFA e antes do abastecimento dos FL1 e FL2 indicam a carga de sólidos extra adicionada ao sistema pela solução coagulante.

Franco (2010) também registra este comportamento em seu sistema FIME uma vez que a perda de carga no filtro lentos de areia, quando não houve adição do coagulante *Moringa oleifera*, atingiram 20cm entre os dias 11 e 15, já quando realizada a adição do coagulante a perda de carga de 20cm foi atingida entre o primeiro e o segundo dia. Porém esta redução mais agressiva encontrada pela autora em comparação a C3 é justificada pelas diferenças entre a preparação e dosagem do coagulante.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observando os valores resultados das práticas realizadas durante esta pesquisa pode-se concluir que:

- O sistema FiME composto pelas etapas de PFD, PFA e FLs, somado a aplicação de coagulantes, registrou eficiências similares às apresentadas por outros autores, porém não foi capaz de se enquadrar aos valores máximos permitidos por legislação segundo Brasil (2021) através da Portaria GM/MS Nº 888 quanto ao parâmetro turbidez, também não houve o emprego de um processo de desinfecção, portanto não pode-se considerar potável a água ao final dos tratamentos, nem recomenda-la para o consumo humano;
- Observa-se que o PFD funcionou de forma semelhante a uma etapa de filtração direta descendente uma vez que não observou-se características como a extravazão e descarte de um volume de água pela obstrução da camada superficial em picos de presença de sólidos suspensos e sólidos grosseiros durante as carreiras de filtração;
- O uso das soluções coagulantes aplicadas no ponto anterior a passagem pelo PFD demonstrou ter potencial de modo aumentar a eficiência de remoção de partículas presentes na água nas etapas de pré-tratamento, PFD+PFA. Durante o parâmetro turbidez, que melhor traduz este comportamento, observou-se eficiência de remoção média de 88,9% em C1, onde não houve aplicação de coagulantes, e 93,9 e 96,9% em C2 e C3, respectivamente, onde houve a aplicação de coagulantes;
- A substituição da camada suporte de material granular por uma camada suporte de não-tecido geotêxtil não resultou em diferença significativa nas eficiências de remoção e valores dos parâmetros monitorados;
- Os dados do parâmetro turbidez demonstram que em C3, onde houve o emprego do coagulante *Moringa oleifera*, foram registrados estatisticamente as melhores eficiências de remoção quando comparado os dados de eficiência do tratamento completo;

- Os dados referentes aos parâmetros temperatura, pH, cor aparente, sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais não apresentaram diferença significativa quando comparados entre os diferentes tratamentos das três carreiras de filtração;
- Em nenhum dos tratamentos realizados durante as carreiras houve eficiência de remoção de sólidos dissolvidos considerável, ao passo que as eficiências de remoção de sólidos suspensos, com exceção de T2C3, todas as demais atingiram valores acima dos 90%, demonstrando que o sistema possui eficiência na remoção de partículas acima de 1,2 $\mu$ m de tamanho;
- Os tratamentos desenvolvidos em C2 onde houve a aplicação da solução coagulante de Sulfato de alumínio apresentaram a menor perda de carga, não atingindo o valor máximo no período de monitoramento estabelecido de 21 dias, fato este atribuído ao funcionamento do mecanismo de sedimentação durante a passagem pelo PFA;
- Em C3 observou-se a menor duração das carreiras de filtração, resultado influenciado para a carga extra de sólidos adicionado ao sistema através da solução coagulante de *Moringa oleifera*, que mesmo assim atingiu valores máximos de perda de carga apenas 3 dias antes de C1.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento dos trabalhos aqui registrados observou-se alguns pontos que podem ser sugeridos em caso de continuação da pesquisa, como:

- Avaliar a aplicação de coagulantes em diferentes pontos do sistema variando sua concentração de modo a identificar a melhor maneira possível de aplicar o processo aproveitando o potencial por ele oferecido;
- Avaliar a eficiência de remoção de parâmetros microbiológicos como cistos de *Giardia* spp., oocistos de *Cryptosporidium* spp., *Escherichia coli* e Coliformes totais;

- Identificar uma melhor maneira de aplicação da *Moringa oleifera* como coagulante adicionado ao sistema FIME de maneira a manter ou melhorar o potencial de ampliação de eficiências de remoção de partículas e reduzir a concentração de sólidos adicionados ao sistema através da solução coagulante proposta.

## REFERÊNCIAS

AITH, F. M. A.; ROTHBARTH, R.. O estatuto jurídico das águas no Brasil. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 29, n. 84, p. 163-177, ago. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142015000200011>.

APHA. **Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater**. 23rd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC, 2017.

ARANTES, C. C.; PATERNIANI, J. E. S.; RODRIGUES, D. S.; HATORI, P. S.; PIRES, M. S. G.. Diferentes formas de aplicação da semente de *Moringa oleifera* no tratamento de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 266-272, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p266-272>.

ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S. Processamento de sementes de *Moringa oleifera* utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** [online]. 2012, vol.16, n.6, pp.661-666. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S141543662012000600011&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141543662012000600011&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 23 de abril de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 6p. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11799: Material Filtrante – Areia, antracito e pedregulho - Especificação**. Rio de Janeiro, p. 11. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público: Procedimentos**. Rio de Janeiro, p. 18. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos: Terminologia**. Rio de Janeiro, 18p. 1995.

BATISTA, L. R.; PEREIRA J.; SILVA M.A.A.; ANTONIOSI Filho, N. R. Produção de filtros de purificação de água a partir de coprodutos da produção de biodiesel etílico de óleo de borra de café. In: 64 **Reunião Anual da SBPC**, 2012, São Luís. Anais da 64 Reunião Anual da SBPC, 2012.

BETTELHEIM, F. A.; BROWN, W. H.; CAMPBELL, M. K.; FARRELL, S. O. **Introdução a química geral, orgânica e bioquímica**. São Paulo: *Cengage Learning*. 9 ed. 1004p. 2016.

BITTENCOURT, C.; PAULA, M. A. S. **Tratamento de Água e Efluentes: Fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. 1. ed., São Paulo: Érica, 177p., 2014.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Cuidando das águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. 2 ed. Brasília ANA, 157p., 2013.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. **Indicadores institucionais do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da água para consumo humano – 2019**. Brasília: Ministério da Saúde, 2020. 35 p.: il.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº888, 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. Brasília, 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019**. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.

CENTER OS AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY – CAWST. **Biosand Filter Manual. Design, Construction, Instalation, Operation and Maintenance**. Training Manual. Canada. 2010.

CHAN, S.; PULLERITS, K.; RIECHELMANN, J.; PERSSON, K. M.; RÅDSTRÖM, P.; PAUL, C. J.. Monitoring biofilm function in new and matured full-scale slow sand filters using flow cytometric histogram image comparison (CHIC). **Water Research**, [S.L.], v. 138, p. 27-36, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.032>.

DI BERNARDO, L; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. **Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. ABES/ PROSAB. Rio de Janeiro, 1999.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: Rima Editora, v. 1. 792 p., 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: LDiBe, 2012.

DI BERNARDO, L; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. L. **Tratabilidade de água e resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LdiBe, 2011, 454p.

FAVA, N. de M. N.; TERIN, U. C.; FREITAS, B. L. S.; SABOGAL-PAZ, L. P.; FERNANDEZ-IBAÑEZ, P.; BYRNE, J. A. Household slow sand filters in continuous and intermittent flows and their efficiency in microorganism's removal from river water. **Environmental Technology**, [S.L.], p. 1-10, 11 nov. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2020.1841834>.

FERNANDES, N. M. G.; GINORIS, Y. P.; RIOS, R. H. T.; BRANDÃO, C. C. S. Influência do pH de coagulação e da dose de sulfato de alumínio na remoção de oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta descendente. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 375-384, dez. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522010000400010>.

FRANCO, M.; SILVA, G. K. e; PATERNIANI, J. E. S.. Water treatment by multistage filtration system with natural coagulant from *Moringa oleifera* seeds. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 32, n. 5, p. 989-997, out. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162012000500018>.

FREITAS, B. L. S. **Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. 2017. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

FREITAS, B. L. S.; TERIN, U. C.; FAVA, N. de M. N.; SABOGAL-PAZ, L. P. Filter media depth and its effect on the efficiency of Household Slow Sand Filter in continuous flow. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 288, p. 112412, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112412>.

FERRAZ, C.F.; PATERNIANI J. E. S. Redução da Espessura da Camada Suporte através da substituição por Mantas não tecidas na Filtração Lenta de Águas de Abastecimento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol. 7-Nº 1-jan/mar 2002.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de Água: Concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: *Elsevier*, 2017.

FORMENTINI-SCHMITT, D. M.Ç FAGUNDES-KLEN, M. R.Ç VEIF, M. T.Ç BERGAMASCO, R.Ç FERRANDIN, A. T. Estudo da eficiência do composto ativo de moringa oleífera extraída com soluções salinas na tratabilidade de águas residuárias da indústria de laticínios. **ENGEVISTA**, v. 16, n. 2, p.221-231, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8961>>. Acesso em 03 de junho de 2021.

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 5. Ed. Brasília, 545p. 2019.

GOMES, L. da S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. de. Silica and its Peculiarities. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 1018-1038, 2018.

Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180072>.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLOUS G. **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo, SP: Cengage, 624p., 2016

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua**. Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/17270-pnad-continua.html?edicao=27258&t=resultados>>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

KOKOSKA, S. **Introdução a estatística: uma abordagem por resolução de problemas**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

KOTZ, J. C.; TREICHEL, P. M.; TOWNSEND, J. R.; TRICHEL, D. A. **Química geral e reações químicas**. São Paulo: *Cengage Learning*, vol.1, 609p. 2016.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3 ed. Campinas: Editora Átomo, 494 p., 2010.

MACEDO, J. A. B. **Águas & águas**.3 . ed. rev. atual. Belo Horizonte: CRQ-MG, 1027 p., 2007.

MACIEL, P. M. F.; SABOGAL-PAZ, L. P. Household slow sand filters with and without water level control: continuous and intermittent flow efficiencies. **Environmental Technology**, [S.L.], v. 41, n. 8, p. 944-958, 4 set. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2018.1515988>.

MADRONA, G. S.; SERPELLONI, G. B.; VIEIRA, A. M. S.; NISHI, L.; CARDOSO, K. C.; BERGAMASCO, R. Study of the Effect of Saline Solution on the Extraction of the *Moringa oleifera* Seed's Active Component for Water Treatment. **Water, Air, & Soil Pollution**, [S.L.], v. 211, n. 1-4, p. 409-415, 12 jan. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-009-0309-0>.

MANN, P. S. **Introdução a estatística**. 8 e. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MAURYA, A.; SINGH, M. K.; KUMAR S. **Biofiltration technique for removal of waterborne pathogens**. *Waterborne Pathogens*. cap.7, 2020.

MEDEIROS, R.C.; FAVA, N. de M. N.; FREITAS, B.L.S.; SABOGAL-PAZ, L.P.; HOFFMANN, M.T.; DAVIS, J.; FERNANDEZ-IBÁÑEZ, P.; BYRNE, J.A.. Drinking water treatment by multistage filtration on a household scale: efficiency and challenges. **Water Research**, [S.L.], v. 178, p. 115816, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2020.115816>.

MEDEIROS, A. C.; LIMA, M. O.; GUIMARÃES, R. M.. Avaliação da qualidade da água de consumo por comunidades ribeirinhas em áreas de exposição a poluentes urbanos e industriais nos municípios de Abaetetuba e Barcarena no estado do Pará, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 695-708, mar. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1413-81232015213.26572015>.

MENDES, C. G. N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 244 p., 1989.

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. de; JULIO, M. de; DUTRA, R. H. de A.; SILVA, P. A. G. da. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 817-824, 11 ago. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016144959>.

MUSHILA, C.N.; OCHIENG, G.M.; OTIENO, F.A.O.; SHITOTE, S.M.; SITTERS, C.W.. Hydraulic design to optimize the treatment capacity of Multi-Stage Filtration units. **Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/B/C**, [S.L.], v. 92, p. 85-91, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.015>.

NI' MATUZAHROH; FITRIANI, N.; ARDIYANTI, P. E.; KUNCORO, E. P.; BUDIYANTO, W. D.; ISNADINA, D. R. M.; WAHYUDIANTO, F. E.; MOHAMED, R. M. S. R. Behavior of schmutzdecke with varied filtration rates of slow sand filter to remove total coliforms. **Heliyon**. vol. 6. 2020.

ROSA, J. L. **Biofiltração aplicada ao tratamento de águas para remoção biodegradação de microcistinas**. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina 2017.

SÁNCHEZ, L. D.; MARIN, L. M.; VISSCHER, J. T.; RIETVELD, L. C.. Low-cost multi-stage filtration enhanced by coagulation-flocculation in upflow gravel filtration. **Drinking Water Engineering And Science**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 73-85, 7 dez. 2012. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/dwes-5-73-2012>.

SANTOS, E. P. C. C. dos; TEIXEIRA, A. R.; ALMEIDA, C. P.; LIBÂNIO, Marcelo; PÁDUA, Valter Lúcio de. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 361-370, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522007000400002>.

SANTOS, F. F. S.; PATERNIANI, J. E. S. Filtração lenta em nãotecido sintético como alternativa de tratamento de água para comunidades rurais: eficiência de remoção de bactérias heterotróficas e do grupo coliforme. **COMBEA**, Campo Grande, 2014.

SOUZA, W. A. **Tratamento de Água**. Natal: CEFET/RN. 149p. 2007.



TANGERINO, E. P.; ARAUJO, L. M. R.; BORGES, R. M.; ORTIZ, I. A. S. Evaluación del desempeño de filtración en múltiples etapas usando carbón activado granular y mantas sintéticas no tejidas. **Interciencia**, vol. 38, núm. 10, octubre, 2013, pp. 726-732 Asociación Interciencia Caracas, Venezuela

TESTEZLAF, R.; DEUS, F. P.; MESQUITA, M. **Filtros de areia na irrigação localizada**. Campinas, SP: UNICAMP/Faculdade de Engenharia Agrícola, 2014.

THEODORO, J.D. P. **Estudo dos mecanismos de coagulação/floculação para a obtenção de água de abastecimento para o consumo humano**. 184f. Tese (Doutorado em Engenharia Química, área de desenvolvimento de processos) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2012.

VERAS, L. R. V.; BERNARDO, L. di. Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas - FIME. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 109-116, mar. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522008000100014>.

YOUNG-ROJANSCHI, Candice; MADRAMOOTOO, Chandra. Intermittent versus continuous operation of biosand filters. **Water Research**, [S.L.], v. 49, p. 1-10, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.011>.

## APÊNDICE 1 – TÍTULO DO APÊNDICE

### APÊNDICE 1- TABELAS REFERENTES AS ANÁLISES ESTATÍSTICAS ANOVA UM FATOR REALIZADAS PARA OS PARÂMETROS.

TABELA 22 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro condutividade elétrica durante a primeira carreira de filtração.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	382,29	4	95,57	4,68	1,30E-03	2,42
Dentro dos grupos	3573,01	175	20,42			
Total	3955,30	179				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 23 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro condutividade elétrica durante a segunda carreira de filtração.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	156,70	4	39,18	12,34	4,93E-09	2,41
Dentro dos grupos	666,48	210	3,17			
Total	823,18	214				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 24 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro condutividade elétrica durante a terceira carreira de filtração.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	14676907,69	4	3669226,92	12,96	3,65E-09	2,43
Dentro dos grupos	45299392,71	160	283121,20			
Total	59976300,40	164				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 25 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro pH durante a primeira carreira de filtração.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,13	4	0,78	63,28	5,31E-33	2,42
Dentro dos grupos	2,16	175	0,01			
Total	5,29	179				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 26 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro pH durante a segunda carreira de filtração.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,66	4	1,42	32,87	2,78E-21	2,41
Dentro dos grupos	9,04	210	0,04			
Total	14,71	214				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 27 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro pH durante a terceira carreira de filtração.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,92	4	0,98	28,59	6,29E-18	2,43
Dentro dos grupos	5,48	160	0,03			
Total	9,40	164				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 28 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro cor aparente na etapa PFD.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	771,20	2	385,60	1,91	0,16	3,28
Dentro dos grupos	6666,32	33	202,01			
Total	7437,52	35				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 29 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro cor aparente na etapa PFA.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2735,74	2	1367,87	7,32	0,01	3,28
Dentro dos grupos	6163,30	33	186,77			
Total	8899,05	35				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 30 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro cor aparente na etapa de FLs.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	19,64	5	3,93	0,98	0,44	2,35
Dentro dos grupos	265,42	66	4,02			
Total	285,05	71				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 31 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez na etapa de PFD.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7534,51	2	3767,25	8,98	2,60E-04	3,09
Dentro dos grupos	41513,83	99	419,33			
Total	49048,34	101				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 32 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez na etapa PFA.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7644,09	2	3822,04	25,30	1,33E-09	3,09
Dentro dos grupos	14956,10	99	151,07			
Total	22600,18	101				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 33 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez na etapa de FLs.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	24948,64	5	4989,73	5,41	1,09E-04	2,26
Dentro dos grupos	182623,9 9	198	922,34			
Total	207572,6 3	203				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 34 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro turbidez no tratamento completo.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	477,7153 8	5	95,54308	23,91943	1,14E-18	2,261138
Dentro dos grupos	766,9193 6	192	3,994372			
Total	1244,634 7	197				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 35 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro sólidos totais durante os tratamentos completos.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	155852,3	5	31170,46	1,37	0,30	3,11
Dentro dos grupos	272653,1	12	22721,09			
Total	428505,4	17				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 36 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro sólidos dissolvidos totais durante os tratamentos completos.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	645434,9	5	129087	1,01	0,45	3,11
Dentro dos grupos	1533210	12	127767,5			
Total	2178645	17				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.

TABELA 37 – Análise de variância ANOVA um fator para parâmetro sólidos suspensos totais durante os tratamentos completos.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	25,59	5	5,12	0,26	0,92	3,11
Dentro dos grupos	232,88	12	19,41			
Total	258,46	17				

FONTE: Autoria própria (2021).

LEGENDA: SG – Soma dos quadrados; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada.