



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS NO TRATAMENTO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA PARA COMUNIDADES RURAIS**

ANA LARA ARAÚJO SANTOS

São Cristóvão/SE

2025

ANA LARA ARAÚJO SANTOS

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS NO TRATAMENTO DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA PARA COMUNIDADES RURAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Conceição de Gois Santos Michelin.

São Cristóvão/SE

2025

Ficha catalográfica

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta qualificação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ana Lara Araújo Santos

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

S237a Santos, Ana Lara Araújo
Aplicação de técnicas alternativas no tratamento de água subterrânea para comunidades rurais / Ana Lara Araújo Santos ; orientadora Denise Conceição de Gois Santos Michelin.. - São Cristóvão, 2025.
119 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2025.

1. Águas subterrâneas. 2. Água potável. 3. Água – Purificação - Coagulação. 4. Água – Purificação - Flocculação 5. Água – Purificação – Filtração. 6. Cactos. I. Michelin, Denise Conceição de Gois Santos Orient. II. Título.

CDU 628.16

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANA LARA ARAÚJO SANTOS

APRESENTADO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 6 DE FEVEREIRO DE 2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dr^a. Denise Conceição de Gois Santos Michelan
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Sergipe – UFS

Prof^o. Dr^o. Ramon Lucas Dalsasso
1^o Examinador
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof^o. Dr^o. Ariovaldo Antonio Tadeu Lucas
2^o Examinador
Departamento de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Sergipe – UFS

Prof^o. Dr^o. Daniel Moureira Fontes Lima
3^o Examinador
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Sergipe – UFS

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Deus, pelo dom da vida e por ter me conduzido em todos os passos.

Aos meus pais, Andreza e Genilson, por todo apoio, compreensão e amor.

À Larissa, minha irmã e melhor amiga, por acreditar em mim e me lembrar sempre de que nunca estarei sozinha.

À minha orientadora, professora Denise Michelan, por ter se dedicado com tanta atenção, paciência e cuidado, me orientando com primor em etapas tão fundamentais da minha vida.

Aos meus amigos, em especial, Vitória Maria e Ronaldo Guilherme, por terem sido minhas companhias ao longo da vida acadêmica.

Ao Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente da UFS, em especial à Tamires, por toda ajuda e dedicação na construção de diversas pesquisas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFS por todos os ensinamentos.

Ao professor Ronaldo e à Juliana pela análise DRX, realizada no Departamento de Física na UFS.

À Jessica Fernanda pelas análises MEV com EDS e BET, realizadas no Condomínio de Laboratórios Multiusuário do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais na UFS.

Aos professores Ramon e Tadeu pelas contribuições desde a qualificação.

A todos, que direta ou indiretamente contribuíram na construção dessa pesquisa.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade”.

(Nikola Tesla)

RESUMO

No Brasil, apesar de milhares de pessoas ainda não possuírem acesso ao abastecimento de água com qualidade, recorrem a soluções individuais, como o uso de água subterrânea que por vezes se encontra com qualidade inferior ao preconizado na legislação. Existem diversas possibilidades alternativas que podem mitigar a situação, como o uso de filtros lentos com meios filtrantes convencionais e não convencionais ou uso de coagulantes/floculantes naturais, possibilitando a redução de problemas sociais voltados ao abastecimento de água, em especial para a população rural, que reside em locais mais isolados aquém do abastecimento de água com qualidade. Desse modo, este estudo teve como objetivo principal verificar a eficiência dos tratamentos de água utilizando filtro lento convencional e não convencional, e utilizando coagulante/floculante natural proveniente do cacto, no tratamento de águas subterrâneas. Assim, na filtração lenta, foram utilizados três filtros de fluxo descendente, sendo estes, filtro com areia (FA), filtro com areia e carvão ativado (FACA) e filtro com areia e biocarvão proveniente do cacto (FABC). Para o tratamento de água com coagulação/floculação, foi avaliado o melhor resultado com o uso de coagulante/floculante oriundo do cacto no tratamento de água subterrânea, para posterior análise da eficiência do referido tratamento em comparação com o FABC. Dessa maneira, conforme testes estatísticos, os resultados indicaram desempenho semelhante entre os filtros convencionais e não convencionais para os parâmetros cor aparente, turbidez, condutividade elétrica e ferro total, com diferenças significativas entre água bruta e filtrada. Ainda, os parâmetros dureza e condutividade elétrica tiveram comportamentos semelhantes com o uso dos filtros, possuindo valores moderadamente superiores com o FABC apenas até o final da primeira carreira de filtração. Na coagulação/floculação, obteve-se remoção de 100% da cor verdadeira, turbidez e demanda química de oxigênio, além de 97% do ferro total. Além disso, ambos os tratamentos não apresentaram alterações significativas com relação à temperatura e pH. Quando comparados os tratamentos (coagulação/floculação e filtração lenta), estes apresentaram diferenças estatisticamente significativas (exceto para o parâmetro ferro total), demonstrando que, ainda que ambas as metodologias apresentem remoções significativas nos parâmetros de qualidade da água avaliados, estas possuem comportamentos de tratamento distintos. Portanto, os resultados indicaram que ambas as soluções alternativas melhoraram significativamente a qualidade da água, sendo estas viáveis para reduzir desigualdades acerca da disponibilização de água com qualidade entre áreas rurais e urbanas.

Palavras-chave: padrão de potabilidade; cacto; coagulação; floculação; filtração lenta.

ABSTRACT

In Brazil, although thousands of people still do not have access to a quality water supply, they resort to individual solutions, such as the use of underground water, which is sometimes of lower quality than recommended by legislation. There are several alternatives that can mitigate the situation, such as the use of slow filters with casual and non-occasional filtering media or the use of natural coagulants/flocculants, making it possible to reduce social problems adverse to water supply, especially for the rural population, which they live in more isolated places without a quality water supply. Therefore, this study's main objective was to verify the efficiency of water filter treatments using conventional and non-conventional slow, and using natural coagulant/flocculant from cactus, in the treatment of groundwater. Thereby, in slow filtration, three downward flow filters were used, these being a filter with sand (FA), a filter with sand and activated carbon (FACA) and a filter with sand and biochar from cactus (FABC). For the treatment of water with coagulation/flocculation, the best result was evaluated with the use of coagulant/flocculant from cactus in the treatment of groundwater, for subsequent analysis of the efficiency of the aforementioned treatment in comparison with FABC. Thus, according to statistical tests, the results indicated similar performance between conventional and non-conventional filters for the parameters apparent color, turbidity, electrical conductivity and total iron, with significant differences between raw and filtered water. Besides, the hardness and electrical conductivity parameters had similar behavior with the use of filters, having moderately higher values with FABC only until the end of the first filtration career. In coagulation/flocculation, 100% of the true color, turbidity and chemical oxygen demand were removed, in addition to 97% of the total iron. Furthermore, both treatments did not show significant changes in relation to temperature and pH. When comparing the treatments (coagulation/flocculation and slow filtration), they showed statistically significant differences (except for the total iron parameter), demonstrating that, although both methodologies present significant removals in the evaluated water quality parameters, they have behavior of different treatments. Therefore, the results indicated that both alternative solutions significantly improved water quality, making them viable for reducing inequalities regarding the availability of quality water between rural and urban areas.

Keywords: potability standard; cactus; coagulation; flocculation; slow filtration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos elementos básicos do filtro lento.	28
Figura 2 - Esquema de filtro lento Filtro lento retrolavável durante a retrolavagem.	29
Figura 3 - Fluxograma da metodologia adotada.	39
Figura 4 - Sistema do poço tubular número 2.	41
Figura 5 - Cacto cortado e higienizado (a), cacto triturado em liquidificador (b) e cacto com água destilada após homogeneização em agitador mecânico (c).	42
Figura 6 - Cacto utilizado no processo (a), material cortado (b), cacto acondicionado na estufa (c), material após o processo de secagem em estufa (d), cacto armazenado em recipiente de plástico (e), material acondicionado em liquidificador (f) e cacto liquidificado e peneirado (g).	44
Figura 7 - Biocarvão proveniente do cacto.	45
Figura 8 - Sistema hidráulico interno ao LABHID.	46
Figura 9 - Curva granulométrica da areia utilizada.	47
Figura 10 - Dimensões e especificações dos meios filtrantes e da camada suporte (em centímetros).	49
Figura 11 - Sachês com carvão comercial ativado e com biocarvão.	49
Figura 12 - Filtros preenchidos com os meios filtrantes (a) e filtros preenchidos envoltos de papel alumínio (b).	50
Figura 13 - Raspagem do meio filtrante.	51
Figura 14 - Isotermas de adsorção.	52
Figura 15 - Isoterma do BC (volume x pressão relativa).	59
Figura 16 - Isoterma do CA (volume x pressão relativa).	59
Figura 17 - Imagens de MEV para BC com ampliações 500x (a), 1500x (c), 5000x (e), 10000x (g), 15000x (i) e imagens de MEV para CA com ampliações 500x (b), 1500x (d), 5000x (f), 10000x (h) e 15000x (j).	60
Figura 18 - Distribuição dos elementos químicos na superfície do BC.	63
Figura 19 - Distribuição dos elementos químicos na superfície do CA.	63
Figura 20 - Resultado da análise DRX para BC (intensidade x ângulo).	63
Figura 21 - Resultados da análise DRX para CA (intensidade x ângulo).	64
Figura 22 - Linha do tempo de operação do sistema avaliado.	65
Figura 23 - Resultados das análises para o parâmetro cor aparente.	66
Figura 24 - Resultados das análises para o parâmetro cor verdadeira.	67
Figura 25 - Resultados de remoção para o parâmetro cor aparente.	67
Figura 26 - Resultado das análises para o parâmetro turbidez.	70
Figura 27 - Resultados de remoção para o parâmetro turbidez.	71
Figura 28 - Resultados das análises para o parâmetro pH.	72
Figura 29 - Resultados das análises para o parâmetro temperatura.	73
Figura 30 - Resultado das análises para o parâmetro condutividade elétrica.	77
Figura 31 - Resultado de remoção para o parâmetro condutividade elétrica.	78
Figura 32 - Resultado das análises para o parâmetro dureza.	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Máximos valores recomendados para características da água bruta conforme tratamento adotado.	9
Quadro 2 - Parâmetros para os tipos de pirólise.	32
Quadro 3 - Composição geral do cacto gênero Opuntia.	37
Quadro 4 - Parâmetros monitorados para a coagulação/floculação.	53
Quadro 5 - Parâmetros monitorados para a filtração.	54
Quadro 6 - Valores máximos permitidos (VMP) dos parâmetros analisados de acordo com a portaria vigente.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados obtidos no processo de pirólise.....	45
Tabela 2 - Resultados da análise BET.....	57
Tabela 3 - Resultado do EDS (porcentagem em peso) dos elementos químicos identificados.	61
Tabela 4 - Estatística descritiva para o parâmetro cor aparente (uH).....	66
Tabela 5 - Análise estatística entre os resultados para cor aparente.....	69
Tabela 6 - Estatística descritiva para o parâmetro turbidez (uT).....	70
Tabela 7 - Análise estatística entre os resultados para turbidez.	72
Tabela 8 - Estatística descritiva para o parâmetro pH.	73
Tabela 9 - Estatística descritiva para o parâmetro temperatura (°C).	74
Tabela 10 - Análise estatística entre os resultados para pH e temperatura.....	75
Tabela 11 - Estatística descritiva para o parâmetro condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	76
Tabela 12 - Análise estatística entre os resultados para condutividade elétrica.....	78
Tabela 13 - Estatística descritiva para o parâmetro dureza (mg/L).....	79
Tabela 14 - Análise estatística entre os resultados para dureza.....	80
Tabela 15 - Resultados das análises de ferro total (mg/L).	81
Tabela 16 - Análise estatística entre os resultados para ferro total.	82
Tabela 17 - Resultados das análises de coliformes totais (NMP/100mL).....	83
Tabela 18 - Resultados das análises de coliformes termotolerantes (NMP/100mL).....	84
Tabela 19 - Análise estatística entre os resultados para coliformes totais e termotolerantes. .	85
Tabela 20 - Análise estatística entre os resultados para água bruta.....	86
Tabela 21 - Resultados das análises para água tratada.	87
Tabela 22 - Resultados da análise estatística entre os tratamentos.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BC	Biocarvão
BET	Brunauer, Emmett e Taller
BJH	Barret, Joyner e Halenda
CA	Carvão ativado
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CLMDCEM	Condomínio de Laboratórios Multiusuário do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DQO	Demanda química de oxigênio
DRX	Difratômetro de Raios X
EDS	Espectrofotômetro de Energia Dispersiva
ETA	Estação de Tratamento de Água
FA	Filtro com areia
FABC	Filtro com areia e biocarvão
FACA	Filtro com areia e carvão ativado
FiME	Filtração em Múltiplas Etapas
FRX	Espectroscopia de Fluorescência de Raios X
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ITPS	Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe
LABHID	Laboratório de Hidráulica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NMP	Número Mais Provável
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organizações das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Policloreto de Vinila
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SAMA	Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente

SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TGA	Analisador Térmico Simultâneo
UFS	Universidade Federal de Sergipe

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 Abastecimento de água	5
3.2 Fontes de água para abastecimento	6
3.2.1 <i>Disponibilidade hídrica subterrânea</i>	7
3.2.2 <i>Captação de água subterrânea</i>	8
3.3 Características da água	8
3.3.1 <i>Físicas</i>	9
3.3.2 <i>Químicas</i>	10
3.3.3 <i>Biológicas</i>	11
3.4 Legislação vigente sobre qualidade da água para consumo humano	11
3.5 Tratamento de água	12
3.5.1 <i>Tratamento convencional</i>	13
3.5.2 <i>Tratamento avançado</i>	15
3.5.3 <i>Tratamento alternativo</i>	16
3.6 Coagulação	17
3.6.1 <i>Mecanismos da coagulação</i>	18
3.6.2 <i>Fatores que intervêm na coagulação</i>	18
3.6.3 <i>Coagulantes</i>	19
3.7 Floculação	20
3.7.1 <i>Mecanismos que intervêm na floculação</i>	20
3.7.2 <i>Floculantes</i>	21
3.8 Decantação	22
3.9 Filtração	23
3.9.1 <i>Generalidades</i>	23
3.9.2 <i>Mecanismos integrantes da filtração</i>	24
3.9.3 <i>Meio filtrante</i>	26
3.9.4 <i>Filtração lenta</i>	27
3.10 Carvão comercial ativado e biocarvão	30
3.11 Caracterização do carvão comercial ativado e do biocarvão	32
3.11.1 <i>Analizador de Área Superficial (BET)</i>	34

3.11.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	35
3.11.3 Difração de Raios X (DRX)	35
3.12 Cacto palma	35
3.12.1 Composição química e bromatológica	36
3.12.2 Múltiplos usos.....	37
4 METODOLOGIA.....	39
4.1 Água bruta utilizada.....	40
4.2 Obtenção e preparação do coagulante/floculante natural	42
4.3 Ensaio de tratabilidade	43
4.4 Obtenção e preparação do biocarvão	43
4.4.1 Preparação do cacto para o processo de pirólise.....	43
4.4.2 Processo de pirólise	44
4.5 Sistema hidráulico utilizado	45
4.6 Meio filtrante e camada suporte	46
4.7 Filtros: Sistema piloto	48
4.8 Caracterização do Biocarvão (BC) e do Carvão Ativado (CA).....	51
4.8.1 BET.....	51
4.8.2 MEV com EDS.....	52
4.8.3 DRX.....	52
4.9 Análise da água bruta e tratada	53
4.10 Legislação vigente e limites comparativos.....	54
4.11 Análise estatística.....	55
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1 Umidade do cacto e rendimento do biocarvão.....	57
5.2 Caracterização: BC e CA.....	57
5.3 Análise dos parâmetros na filtração	65
5.3.1 Cor.....	65
5.3.2 Turbidez.....	69
5.3.3 pH e temperatura.....	72
5.3.4 Condutividade elétrica	76
5.3.5 Dureza	79
5.3.6 Ferro total	81
5.3.7 Coliformes totais e termotolerantes	82
5.4 Análise dos parâmetros na coagulação/floculação	85
5.4.1 Água bruta.....	86

5.4.2 <i>Água coagulada/floculada</i>	86
5.5 Comparação: resultados com coagulação/floculação versus FABC	89
6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	90
7 CONCLUSÕES	91
8 PERSPECTIVAS FUTURAS	93
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

O objetivo do saneamento básico é desenvolver um ambiente favorável para a vida humana, por meio da gestão adequada de resíduos sólidos, da coleta e do tratamento de esgoto, da drenagem urbana e do abastecimento de água (Vasconcelos; Albuquerque, 2019). Desta forma, dentre os pilares dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no Brasil, destaca-se o objetivo número 6, que diz respeito à água potável e saneamento, compreendendo garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para a população (ONU, 2015). Contudo, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2022), quanto ao abastecimento de água no Brasil, em 2021, ainda existiam cerca de 33 milhões de pessoas sem acesso a este fornecimento.

Ressalta-se ainda que no Brasil, de acordo com o SNIS para dados de 2021, em torno de 93% da população urbana possuía rede de abastecimento de água, enquanto cerca de 70% da população rural ainda não tinha acesso a esse serviço (SNIS, 2022).

Desse modo, apesar do tratamento de água ser essencial na qualidade de vida da população, segundo Heller e Pádua (2010), o poder público ainda não garante água com qualidade a milhares de brasileiros, em especial aos que residem em comunidades isoladas, como as rurais, as quais precisam recorrer a soluções alternativas de tratamento. Além de que, conforme Ferreira *et al.* (2021), as águas subterrâneas são tradicionalmente utilizadas para abastecer as comunidades rurais devido à facilidade de obtenção, contudo, a ausência de programa de monitoramento da qualidade das águas nas comunidades rurais prejudica a preservação e conservação dos recursos hídricos subterrâneos, representando risco à saúde pública.

Segundo Foster *et al.* (2002), existem diversas causas antrópicas para a deterioração da qualidade da água subterrânea, dentre as quais têm-se as fontes de contaminação da água, como o descarte de esgoto doméstico e industrial em fossas e tanques sépticos, e a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e industriais, o que resultam em poluição das águas por substâncias orgânicas e inorgânicas, parasitas, bactérias e vírus patogênicos (Silva; Araújo, 2003).

Além disso, ao que concerne o raio de influência de contaminação das captações subterrâneas, é de fundamental importância a proteção aos arredores dos pontos de captação, tendo em vista que, conforme Schultz *et al.* (2025), para garantir os padrões de potabilidade da água, torna-se fundamental o planejamento e a gestão da ocupação e do uso do solo, de modo a atender tanto às exigências legais, quanto às especificidades das comunidades.

Desta forma, torna-se necessária a disponibilização de técnicas de tratamento que possam ser aplicadas nas comunidades sem sistemas de monitoramento de qualidade da água e abastecimento público. Por conseguinte, diversos estudos com a vertente de tratamento de água utilizando materiais sustentáveis e alternativos ressaltam a eficiência de seu uso, assim, no que concerne ao tratamento alternativo de água, existem diversas possibilidades a fim de sanar tal déficit, a exemplo do uso de filtros com meios filtrantes sustentáveis e de coagulantes naturais.

Além de que, no panorama da filtração, tem-se a filtração lenta, em que, a reduzida frequência de limpeza dos filtros e a ausência da necessidade de coagulante químico tornam esse método simples e viável, mesmo em áreas remotas, o que representa uma alternativa com potencial de implantação em comunidades mais isoladas (Heller; Pádua, 2010).

Quanto ao uso de coagulantes naturais, estes são possibilidades sustentáveis de fácil acesso, abundantes no meio ambiente e com baixa toxicidade (Lima Júnior; Abreu, 2018), entretanto, para que esses sejam utilizados no tratamento em grande escala, se torna necessário estudos de quantificação, de modo a ter quantidade suficiente para sua utilização.

Como exemplo de uso de polímero natural no processo de coagulação e floculação no tratamento de água, tem-se o cacto (Zara; Thomazini; Lenz, 2012; Goes *et al.*, 2017; Santos; Vieira, 2018; Riss *et al.*, 2022), que é uma planta típica do Brasil e abundante, em especial na região do nordeste brasileiro (Davet, 2005), além de possuir custo menor quando comparado com os coagulantes químicos (Goes *et al.*, 2017), as plantas são formadas por polímeros complexos com propriedade coagulante e floculante (Altamirano; Lévano; Yapu, 2020).

Zara, Thomazini e Lenz (2012) constataram que o uso do polímero natural do cacto mandacaru associado ao sulfato de alumínio, no tratamento de água, promove a formação de flocos maiores em comparação ao coagulante químico sulfato de alumínio, o que resulta no aumento da velocidade de decantação, tornando o processo mais eficiente e a produção de água tratada maior. Ainda, Goes *et al.* (2017) e Santos e Vieira (2018), observaram que o uso do coagulante natural proveniente do cacto é efetivo na redução dos parâmetros turbidez e cor aparente, alcançando taxas de remoções expressivas.

Além disso, dentre as tecnologias que englobam o uso de materiais sustentáveis, faz-se presente o biocarvão, cujo desenvolvimento tecnológico de produção busca otimizar e maximizar a relação custo/benefício no tratamento de água, tendo em vista que o biocarvão advém de materiais de baixo custo. Todavia, para o processo de fabricação do biocarvão é necessário expressivo controle de temperaturas significativas para o processo de pirólise (Carvalho, 2018).

No cenário do uso de biocarvão utilizado como recheio para a filtração, Sousa, Reis Junior e Rodrigues (2018), em seus estudos com água subterrânea, desenvolveram tratamento de água utilizando filtro com biocarvão, produzido com endocarpo de coco, borracha de pneu e caroços de açaí, no qual foi possível observar que a aplicação dos filtros com materiais alternativos trouxe remoção significativa no teor de ferro da água.

Costa *et al.* (2022), por sua vez, avaliaram a eficiência de filtros no tratamento de água, usando biocarvão ativado de diferentes fontes, como a madeira descartada, a entrecasca do coco verde, a casca do fruto do caju e do colmo de bambu, tendo constatado que, o filtro de colmo de bambu forneceu melhores resultados, obtendo redução de diversos parâmetros, como turbidez, cor, sódio e dureza total.

Deste modo, tendo em vista o contexto acerca de tratamentos alternativos de água, quanto aos meios filtrantes alternativos, tem-se o cacto como um possível material para produção de biocarvão, para fins de tratamento de água. Choudhary, Kumar e Neogi (2020), utilizaram biocarvão ativado e não ativado, provenientes do cacto (*Opuntia ficus-indica*), como adsorventes em água sintética, de poluentes orgânicos e inorgânicos como o corante verde de malaquita e metais pesados Cu^{+2} e Ni^{+2} , sendo observado notável capacidade de adsorção dos compostos analisados.

Elhleli *et al.* (2020), avaliaram o uso de biocarvão ativado advindo do cacto (*Opuntia ficus-indica*) para a adsorção de p-nitrofenol da água, sendo observadas satisfatórias características de adsorção do composto químico. Além disso, os autores sugerem que o uso de *Opuntia ficus-indica* pode ser uma alternativa promissora para a fabricação de carvão ativado de baixo custo sendo opção viável, principalmente para países que possuem escassez de florestas.

Desta maneira, observa-se que, independentemente da solução de abastecimento de água potável adotada, seja convencional ou alternativa, existem vantagens e desvantagens em ambas as soluções, entretanto, devido às dificuldades de acesso presentes nas comunidades mais isoladas, pesquisas de baixo custo e com enfoque sustentável podem proporcionar diversas alternativas para comunidades sem acesso ao saneamento básico, em especial ao que tange o fornecimento de água potável com qualidade. Diante do exposto, o estudo propôs verificar a eficiência no uso do cacto no tratamento de água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Verificar a eficiência do tratamento da água subterrânea para comunidades rurais utilizando cacto (*Opuntia ficus-indica*) como meio filtrante (biocarvão) em filtro descendente e como coagulante/floculante natural.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o carvão ativado em pó de alta pureza de origem vegetal e o biocarvão;
- Avaliar, com base nos parâmetros físicos, químicos e biológicos, a qualidade das águas: bruta; filtrada com filtro com areia; filtrada com filtro com carvão comercial ativado em pó de alta pureza e areia; filtrada com o biocarvão advindo do cacto e areia;
- Avaliar, com base nos parâmetros físico-químicos, a qualidade das águas bruta e coagulada/floculada com coagulante/floculante natural advindo do cacto por meio de ensaio de tratabilidade.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Abastecimento de água

A água se distribui no planeta por meio de diversos mecanismos de transferência do ciclo hidrológico, sendo estes a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração, a evaporação e a transpiração. É de suma importância a preservação dos recursos hídricos, além do conhecimento da distribuição e circulação da água no planeta, tendo em vista que, apesar da água ser fundamental para a manutenção da vida, do montante de água disponível no planeta Terra, apenas 0,8% é classificada como água doce (von Sperling, 1996).

Dentre os múltiplos usos da água, destacam-se o abastecimento humano, irrigação, geração de energia elétrica, consumo animal, diluição de efluentes, pesca, navegação, paisagismo e recreação (Collischonn; Dornelles, 2013). Dessa maneira, o abastecimento humano é considerado o uso mais nobre da água, o qual deve possuir sistema de abastecimento que transporte água para a população em quantidade e com qualidade, devido às necessidades populacionais relacionadas ao desenvolvimento industrial e à saúde (Tsutiya, 2006).

Ainda de acordo com Tsutiya (2006), os componentes do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) são o manancial, que pode ser um corpo d' água superficial ou subterrâneo; a captação, com um conjunto de estruturas e dispositivos para a retirada de água do manancial; a estação elevatória, que recalca a água para a unidade seguinte por meio de obras e equipamentos; a adutora, que é uma canalização que conduz a água entre as unidades que antecedem a rede de distribuição; a Estação de Tratamento de Água (ETA), destinada a adequar a água aos padrões de potabilidade com um conjunto de unidades; o reservatório, sendo um elemento destinado a armazenar a água a fim de regularizar as vazões e as pressões entre adução e distribuição; e a rede de distribuição, que é composta por acessórios e tubulações que conduzem água potável para a população de maneira contínua e segura.

Para Heller e Pádua (2010) as consequências da ineficácia ou ausência do abastecimento de água com qualidade podem ocasionar a transmissão de doenças de veiculação hídrica, devido à contaminação da água por agentes químicos e biológicos patogênicos. Portanto, torna-se importante a avaliação da qualidade da água por meio das características físicas, químicas ou biológicas, a fim de quantizar a potabilidade para seus devidos fins (Collischonn; Dornelles, 2013).

3.2 Fontes de água para abastecimento

A partir de diversas fontes pode ser obtida água para consumo, seja privado ou público, como fonte superficial, subterrânea (Miranda; Monteggia, 2007) ou até mesmo fontes desprovidas de redes, como o uso da água de chuva (Heller; Pádua, 2010).

Ao que tange às fontes de água superficial, estas são os mananciais superficiais, como cursos d'água, lagos e represas. Deste modo, para se determinar a escolha de manancial superficial, esta é fundamentada na condição de que sua vazão média seja superior à demanda necessária para abastecer, parcial ou totalmente, a população para a qual a água será destinada (Libânio, 2010). Contudo, além da quantidade de água, deve-se também escolher o manancial superficial conforme a qualidade da água disponível e aspectos econômicos (Heller; Pádua, 2010).

Quanto às fontes de água subterrânea, em linhas gerais, são os aquíferos confinados e não confinados (Libânio, 2010), sendo os aquíferos classificados como cárstico, poroso ou fraturado, conforme a água circula no solo. Além disto, para se escolher o manancial subterrâneo, devem ser realizados estudos quanto às características do manancial levando em consideração suas particularidades (Heller; Pádua, 2010). Cabe salientar que as fontes de água subterrânea resultam da infiltração de água proveniente da alimentação direta dos lagos, rios e precipitação (Miranda; Monteggia, 2007).

Conforme Libânio (2010), assim como as águas superficiais, a poluição dos mananciais subterrâneos também pode ser difusa (devido à agrotóxicos e nitratos que são utilizados na agricultura) ou pontual (devido a efluentes, aterros sanitários, entre outros). Portanto, como são diversas as fontes de poluição e contaminação das águas citadas (lançamento de águas residuárias, infiltração no solo, precipitação atmosférica, intervenções estruturais, entre outras) é importante identificar tais fontes, a fim de reduzir os custos relacionados ao tratamento da água e riscos sanitários (Heller; Pádua, 2010).

Ademais, como fontes desprovidas de redes, ainda se tem a utilização de água de chuva, sendo esta predominante no abastecimento domiciliar na região do nordeste brasileiro (Libânio, 2010). Ainda, são denominados de caixas ou cisternas os reservatórios das águas de chuva que são de maneira geral construídos em placas de cimento, ferrocimento ou alvenaria, sendo a primeira opção a mais utilizada no Brasil. Assim, em linhas gerais, a água de chuva que cai sobre os telhados das residências é coletada em calhas e acondicionada nos reservatórios, sendo necessários cuidados quanto à utilização deste recurso devido a possibilidade de contaminação em face do arraste de impurezas presentes nos telhados das residências (Heller; Pádua, 2010).

Desta maneira, vale mencionar que, independentemente da solução de abastecimento de água adotada para a população, esta deve ser adequada para atender aos padrões de potabilidade exigidos em legislação para que o consumo humano ocorra de maneira efetiva e segura.

3.2.1 Disponibilidade hídrica subterrânea

Têm-se como o maior reservatório de água os aquíferos, uma vez que nestes estão presentes 97% das águas líquidas e doces do planeta (Hirata *et al.*, 2019). A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2023) cita que a qualidade da água superficial e subterrânea determina sua disponibilidade para diversos usos, como abastecimento humano, recreação, produção de alimentos e indústria, sendo a qualidade influenciada por variáveis naturais, como regime de chuvas, escoamento, geologia e cobertura vegetal, além de impactos antrópicos, incluindo efluentes e uso da terra. Deste modo, a disponibilidade de água subterrânea do Brasil é estimada em torno de 13.205 m³/s, e assim como às águas superficiais, sua ocorrência pelo território não é uniforme, possuindo características hidrogeológicas e de produtividade variáveis.

Além disto, frisa-se que, segundo Cirilo (2008), na região do nordeste brasileiro ocorre a presença de águas subterrâneas, para poços constituídos por rochas cristalinas, com alto teor de sais captadas, e vazões com cerca de 1 m³/h, e para poços constituídos por rochas sedimentares, com água com melhor qualidade e vazões entre dezenas e centenas de m³/h.

Ao que tange o uso de água subterrânea no Brasil, de acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2024), no ano de 2024 (conforme atualização em 23 de dezembro de 2024), existiam cerca de 382.305 registros de poços perfurados de tipos construtivos diversos no país, sendo a região do nordeste brasileiro detentora de 208.901 registros, o que corresponde a aproximadamente 54,6% do total das perfurações registradas no país.

Desta maneira, torna-se possível constatar que as águas subterrâneas possuem importância para o abastecimento da população, principalmente com a demanda de água crescente ao longo dos anos, sendo uma fonte de abastecimento hídrico para diversos fins de consumo.

3.2.2 Captação de água subterrânea

A determinação do tipo de captação de água subterrânea está relacionada à potencialidade e tipo do aquífero, além da demanda de água e finalidade de uso, sendo que essas opções possuem reflexos diretos quanto aos custos (Iritani; Ezaki, 2012). Ademais, são diversas as possibilidades de captação da água subterrânea, como o poço escavado, poço tubular (Vasconcelos, 2017), nascentes (Iritani; Ezaki, 2012), entre outros.

Vasconcelos (2017), ao traçar um panorama das terminologias utilizadas na denominação das unidades de captação de água subterrânea, observou que o poço pode ser considerado tubular caso tenha sido construído com a utilização de máquinas e revestido por tubos, caso contrário, denomina-se como escavado. O poço tubular pode ser freático, se não ocorrer elevação do nível de água, caso contrário, se intitula como artesianos jorrante ou não jorrante. O poço escavado, caso não possua revestimento, pode ser determinado como cacimba, e caso possua revestimento e diâmetro maior que 5 m se intitula como amazonas, ainda, se possuir revestimento e diâmetro menor que 5 m se denomina como cacimbão.

A nascente ou fonte natural, por sua vez, acontece quando a água brota espontaneamente no terreno, ocorrendo sob determinadas condições geológicas e topográficas, caracterizando uma região de descarga dos aquíferos. Ainda, este tipo de captação, assim como o poço cacimba, deve ser protegido de fontes potenciais de contaminação, como fossas, depósitos de lixo, entre outros (Iritani; Ezaki, 2012).

Além disso, vale frisar que, quanto a fonte de abastecimento de água, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2020), no Brasil, em 2019, com a estimativa de 72,4 milhões de domicílios particulares permanentes, foi observado a predominância do uso de poços profundos ou artesianos no país após o uso da rede geral de distribuição.

3.3 Características da água

Segundo von Sperling (1996), existem diversos parâmetros que retratam a qualidade da água, traduzindo as suas principais características físicas, químicas e biológicas. Dessa forma, ao versar sobre análise de água, tem-se que tais parâmetros devem ser selecionados levando em consideração as particularidades de cada situação. Ademais, os parâmetros frequentemente são expressos como concentrações de determinadas substâncias que estão presentes na água, de modo que tais valores são importantes para caracterizar a água em função do uso para o qual se

destina (Collischonn; Dornelles, 2013) e em face da tecnologia de tratamento a ser aplicada, tendo em vista que as características da água bruta é o fator principal para definir a tecnologia de tratamento que será utilizada (Libânio, 2010) como exemplificado no Quadro 1.

Quadro 1 - Máximos valores recomendados para características da água bruta conforme tratamento adotado.

Técnicas de tratamento	Valores máximos recomendados para água bruta				
	Cor verdadeira (uH)	Turbidez (uT)	Ferro total (mg/L)	Coliformes (NMP*/100 mL)	
				Totais	Termotolerantes
Tratamento convencional	Depende do nível de turbidez	250	2,5	20000	5000
Filtração lenta	5	10	1,0	2000	500
FiME	10	100	3,0	20000	5000
Dupla filtração	150	200	15,0	2000	5000
Filtração direta descendente	25	25	2,5	2500	500
Filtração direta ascendente	100	100	15,0	5000	1000

*NMP: número máximo provável

Fonte: Adaptado de Heller e Pádua (2010).

Desta forma, observa-se que as características da água bruta é um dos fatores determinantes de qual método de tratamento será mais eficaz na melhora da qualidade da água. Ademais, essas características englobam diversos parâmetros, sejam físicos, químicos ou biológicos, como os mencionados e explicitados no decorrer deste tópico.

3.3.1 Físicas

Diversos parâmetros físicos são citados por von Sperling (1996), entre eles, cor, turbidez e temperatura. Salienta-se que tais parâmetros se diferenciam pela forma do constituinte responsável e pela sua origem, podendo esta ser natural, antropogênica ou ambas. Ao tratar sobre o parâmetro físico cor, este diz respeito à coloração na água, tendo como constituinte responsável os sólidos dissolvidos. Assim, a cor pode ser classificada como cor aparente, em face da ausência da passagem da água pelo processo de centrifugação resultando em sua

turbidez, ou como cor verdadeira, sendo esta obtida com a remoção da turbidez por centrifugação.

Ainda para von Sperling (1996), a turbidez tem como constituinte responsável os sólidos em suspensão e confere à água aparência turva, tendo em vista que representa o grau de interferência da passagem da luz através da água. A temperatura compreende a medição da intensidade de calor (von Sperling, 1996), sendo considerada um dos parâmetros mais importantes da água, pois afeta as suas características químicas e físicas (Collischonn; Dornelles, 2013).

Além de que, no cenário dos diversos parâmetros físicos, também se faz presente a condutividade elétrica, que traduz a capacidade da água em conduzir corrente elétrica. Reflete a quantidade de sais presentes na água, constituindo, portanto, uma medida indireta da concentração de poluentes. Ainda, de maneira geral, valores acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indicam ambientes impactados (CETESB, 2013). Desta forma, mudanças neste parâmetro podem sugerir que a descarga de efluentes ou outra fonte de contaminação está afetando de forma negativa a qualidade da água (Boas *et al.*, 2023).

3.3.2 Químicas

Dentre os parâmetros químicos, tem-se o potencial hidrogeniônico (pH), dureza, ferro total, manganês, Demanda Química de Oxigênio (DQO), alumínio, flúor, entre outros (CETESB, 2013), de modo que, assim como os parâmetros físicos, os parâmetros químicos também se diferenciam pela forma do constituinte responsável e pela origem, a qual também pode ser natural, antropogênica ou ambas (von Sperling, 1996).

O pH compreende o grau de alcalinidade, neutralidade ou acidez da água. Ainda, a dureza refere-se à concentração de cátions multimetálicos em solução, como os cátions divalentes Ca^{2+} e Mg^{2+} . Enquanto o ferro e manganês, em águas subterrâneas, apresentam-se na forma solúvel (Fe^{2+} e Mn^{2+} , respectivamente). Já a DQO é uma medição indireta da matéria orgânica presente na água, na qual é quantificado o consumo de oxigênio que ocorre na oxidação química da matéria orgânica (von Sperling, 1996).

O metal alumínio pode ocorrer na água de maneira diversificada, sendo afetado por vários fatores, incluindo temperatura, sulfatos, matéria orgânica, pH, entre outros. Além disso, o metal alumínio tem baixa solubilidade em pH entre 5,5 e 6,0. Já o flúor, é o elemento químico com maior eletronegatividade, sendo geralmente encontrado como fluoreto (CETESB, 2013).

3.3.3 Biológicas

Os parâmetros biológicos se referem à qualidade biológica da água. A determinação da referida potencialidade da água transmitir doenças pode ser efetuada indiretamente, por meio dos organismos indicadores, em especial, aos pertencentes ao grupo de coliformes (von Sperling, 1996), e se referem, em síntese, aos microrganismos que indicam a presença de dejetos de origem humana ou animal na água (Collischonn; Dornelles, 2013).

Segundo a Fundação Nacional de Saúde - FUNASA (2013) os coliformes totais são bactérias do grupo coliforme, capazes de fermentar a lactose, produzindo aldeído, ácido e gás, à temperatura de $35,0 \pm 0,5$ °C em período de 24 a 48 horas. Enquanto os coliformes termotolerantes constituem um subgrupo das bactérias do grupo coliforme, com capacidade de fermentar a lactose à temperatura de $44,5 \pm 0,2$ °C em período de 24 horas, além de que, este subgrupo é representado principalmente pela *Escherichia coli* (origem fecal).

Além de que, ainda ao que se refere à presença de organismos nocivos presentes na água de abastecimento, podem se fazer presentes protozoários patogênicos como *Cryptosporidium* e *Giardia*, tendo em vista que Fregonesi *et al.* (2012), ao analisarem dados científicos acerca da contaminação da água de abastecimento público através destes protozoários, constataram o potencial de disseminação destes em águas superficiais e subterrâneas, o que destacou a necessidade de avanços quanto a proteção das águas seja qual for a origem.

Dessa forma, o controle da qualidade da água para o consumo, com o objetivo de minimizar a transmissão de doenças, por meio de organismos indicadores, serve como forma de elevar a confiabilidade microbiológica da água ao que concernem os requisitos de potabilidade exigidos (Libânio, 2010).

3.4 Legislação vigente sobre qualidade da água para consumo humano

A conservação da saúde da população abastecida com água de qualidade advém da combinação entre padrões de potabilidade restritivos e eficácia das medidas de monitoramento referentes à qualidade da água (Libânio, 2010). Neste panorama, faz-se presente a Portaria de Potabilidade nº 888 de 2021 do Ministério da Saúde, como forma de controle e vigilância no tocante ao padrão de potabilidade da água e sua qualidade para consumo humano (Brasil, 2021).

De acordo com Brasil (2021), a água potável é definida como sendo aquela que atende ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde, enquanto o padrão de potabilidade

é o conjunto de valores permitidos para os parâmetros da qualidade da água para abastecimento, que é estabelecido na Portaria de Potabilidade nº 888 de 2021 do Ministério da Saúde.

Quanto aos parâmetros de monitoramento, quando utilizado o manancial superficial como fonte de abastecimento de água, deve-se realizar as análises acerca da demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, oxigênio dissolvido, cor verdadeira, turbidez, fósforo total, pH, nitrogênio amoniacal total e os parâmetros orgânicos, inorgânicos e agrotóxicos. Quando a fonte de abastecimento for manancial subterrâneo, os parâmetros analisados devem ser cor verdadeira, turbidez, fósforo total, pH, nitrogênio amoniacal total, condutividade elétrica, os parâmetros orgânicos, inorgânicos e agrotóxicos. Frisa-se que os limites exigidos para os parâmetros citados estão estabelecidos na referida portaria (Brasil, 2021), além disso, torna-se relevante mencionar que a análise do parâmetro coliformes (totais e termotolerantes) nas águas é de suma importância, dado que o parâmetro traz indicativo da presença de microrganismos patogênicos e possíveis fontes de poluição.

Portanto, são de suma importância as medidas de vigilância e o estabelecimento de normativas quanto à qualidade da água, tendo em vista que estas visam a preservação do corpo hídrico e da saúde da população, sendo estes dois aspectos intrinsecamente correlacionados.

3.5 Tratamento de água

De acordo com Libânio (2010), o tratamento de água consiste na remoção de matéria orgânica, partículas coloidais e suspensas, microrganismos e demais substâncias presentes nas águas naturais que possam ser prejudiciais à saúde humana, a fim de adequar a água bruta aos limites físicos, químicos, biológicos e radioativos estabelecidos pela portaria vigente. Ainda, é necessário que o tratamento de água ocorra com os menores custos de implantação, manutenção e operação, para que seja possível solucionar ao máximo os problemas ambientais e sociais ocasionados devido à falta deste.

A tecnologia empregada no tratamento de água para consumo humano parte de algumas proposições para a implantação, como as características da água bruta, o manuseio e confiabilidade dos equipamentos, os custos de implantação, manutenção e operação, a localização geográfica, a flexibilidade operacional e as características da comunidade, além da disposição final do lodo (Libânio, 2010). Dentre as tecnologias de tratamentos de água tem-se: convencional, avançada e simplificada.

3.5.1 Tratamento convencional

Nas ETAs brasileiras, de maneira geral, utiliza-se a técnica de tratamento da água denominada de convencional ou ciclo completo, que consiste nas etapas de mistura rápida com coagulação, floculação (mistura lenta), decantação, filtração, desinfecção e fluoretação. Nessa técnica é possível tratar águas com significativas concentrações de materiais em suspensão e dissolvido (Libânio, 2010).

Ao que concerne à mistura rápida com coagulação, de acordo com Libânio (2010), a coagulação consiste na desestabilização das impurezas presentes na água, devido às ações físicas e reações químicas ocasionadas em face do contato entre as impurezas e o coagulante. Frisa-se ainda que o processo de coagulação é realizado na unidade de mistura rápida na estação de tratamento.

Além disso, os coagulantes usualmente utilizados são os químicos, como o sal de alumínio e de ferro, que em ambientes aquosos liberam íons metálicos positivamente carregados, já as partículas suspensas e coloidais dispersas na água possuem cargas predominantemente negativas. Portanto, quando ocorre a dispersão do coagulante no meio aquoso na etapa de mistura rápida, surgem espécies hidrolisadas que atuam sobre as superfícies das impurezas ou reagem quimicamente com estas, reduzindo a força repulsiva e propiciando as forças de atração entre as impurezas nas etapas posteriores (Libânio, 2010). Cabe salientar que devem ser fornecidas condições em termo de tempo de detenção e gradiente de velocidade, para que as reações químicas aconteçam como estipuladas e favoreçam as etapas seguintes (Pádua; Heller, 2010).

A floculação, por sua vez, é a etapa em que ocorre a aglomeração das impurezas e formação dos flocos nas unidades de floculação, tendo em vista as reações químicas que ocorreram na unidade de mistura rápida com coagulação (Richter, 2009; Heller; Pádua, 2010). Portanto, na floculação ocorre uma série de fenômenos físicos a fim de reduzir o número de partículas suspensas e coloidais presentes na água (Libânio, 2010). Ressalta-se que, de acordo com Heller e Pádua (2010), na etapa de floculação devem ser fornecidas condições, em termos de tempo e agitação, para que ocorram os choques entre as partículas desestabilizadas e assim ocorra a formação dos flocos de maneira adequada, os quais serão removidos nas etapas seguintes.

Quanto à etapa da decantação, esta compreende o processo que resulta da utilização da força da gravidade sobre as impurezas, para sedimentar no fundo dos decantadores as partículas que possuem densidade maior que a da água (Miranda; Monteggia, 2007; Richter, 2009),

ocasionando a clarificação do sobrenadante (Heller; Pádua, 2010). Para Libânio (2010). A decantação traduz a eficiência das etapas anteriores, sendo estas, coagulação e floculação, considerando que na decantação serão fornecidas condições que permitam depositar, devido à ação da gravidade, os flocos formados anteriormente. Portanto, a eficiência da unidade de decantação é diminuída quando ocorre o mau funcionamento nas unidades anteriores (Heller; Pádua, 2010).

Após a decantação a água é conduzida para os filtros, podendo estes ser de fluxo ascendente ou descendente e possuir leitos filtrantes diversificados (Miranda; Monteggia, 2007). Em quase todos os tipos de filtros este meio se apoia sobre camada suporte (Libânio, 2010). De acordo com Richter (2009), a filtração é uma das etapas mais importante no tratamento de água, podendo ser a única etapa, como na filtração lenta, ou apenas precedida pela coagulação e floculação, como na filtração direta.

Ainda, Libânio (2010) cita que esta etapa tem a finalidade de remover as partículas responsáveis pela turbidez e cor, que caso estejam presentes diminuiriam a eficácia da desinfecção na eliminação dos microrganismos patogênicos. Desse modo, de maneira geral, a filtração pode ser rápida, que consiste na conjunção dos mecanismos de transporte e de aderência, e lenta, na qual o mecanismo de transporte agrega-se a filtração biológica desempenhada pelos microrganismos responsáveis pela remoção de patógenos, que se desenvolvem no interior do meio filtrante. Ademais, Richter (2009) menciona que outros fatores que classificam os filtros como lentos ou rápidos, são o método de limpeza e a taxa de operação.

Após a etapa da filtração, ocorre a desinfecção dos agentes patogênicos, pois, apesar dos microrganismos possuírem importância no controle da qualidade da água, no processo de autopurificação de um corpo hídrico, algumas espécies são responsáveis por prover sabor e odor na água, além de doenças, de modo que a etapa de desinfecção torna-se importante para a inativação dos microrganismos patogênicos (Richter, 2009). Entretanto, vale frisar que, de acordo com Heller e Pádua (2010), a desinfecção elimina os organismos patogênicos e não todas as formas vivas presentes na água.

Conforme Heller e Pádua (2010), a desinfecção da água tem caráter corretivo e preventivo, com o intuito de manter a potabilidade da água, sendo que a eficiência desta etapa depende de diversos fatores, como os tipos de organismos, tempo de contato do agente desinfectante com a água, dosagem, tipo de agente químico utilizado, entre outros. Os agentes químicos mais utilizados na desinfecção são os oxidantes cloro, iodo, bromo, ozônio, peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio e os íons metálicos cobre e prata, enquanto os agentes

físicos mais utilizados são o calor e a radiação ultravioleta, podendo também ocorrer a desinfecção com a utilização de radiação ionizante.

Após os processos físico-químicos que ocorrem no tratamento da água, sucede a última etapa que é a de fluoretação, na qual ocorre a aplicação do flúor, com o objetivo de combater a cárie bucal infantil (Libânio, 2010; Heller; Pádua, 2010). Heller e Pádua (2010) citam que, em linhas gerais, o flúor é adicionado à água na forma de fluorsilicato de sódio, ácido fluorsilícico, fluoreto de sódio ou de cálcio (fluorita). Portanto, qualquer composto solúvel de flúor que, em solução aquosa libera o íon fluoreto, é possível de ser utilizado na fluoretação de águas de abastecimento (Libânio, 2010). Desse modo, após as etapas supracitadas no tratamento convencional, objetiva-se ofertar à água qualidade e potabilidade suficientes para que esta não resulte em malefícios à saúde da população.

3.5.2 Tratamento avançado

Quando é necessária a remoção de particulados com eficiência superior à das técnicas tradicionais de tratamento de água ou quando ocorre comportamento atípico dos flocos após as etapas convencionais de tratamento, se fazem presentes os tratamentos avançados. A adoção destes depende das características finais a serem conferidas à água tratada (Heller; Pádua, 2010). Alguns tratamentos avançados são a flotação a ar dissolvido e as membranas filtrantes, que já são empregados em número ainda relativamente pequeno de ETAs.

Quanto à flotação a ar dissolvido, em consonância com as ideias de Heller e Pádua (2010), na flotação a clarificação da água é alcançada por meio da produção de bolhas que se aderem aos flocos ou partículas em suspensão, aumentando o empuxo e provocando a ascensão dos flocos até a superfície do flotador, local onde são removidas, enquanto na decantação a força de gravidade atua fazendo as partículas se depositarem no fundo do decantador.

Richter (2009) explica que o processo de flotação ocorre devido a elevação da pressão de uma pequena quantidade de água clarificada por uma bomba, sendo direcionada ao tanque de saturação, no qual a água se torna saturada de ar devido a um compressor. A recirculação no sistema tem abrupta redução de pressão, o que resulta na liberação de grande quantidade de microbolhas de ar que aderem aos flocos já formados, induzindo-os a flutuar. Os flocos que flutuam, quando acumulados na superfície do tanque, formam uma capa de lodo que é removida por raspadores superficiais.

De acordo com Heller e Pádua (2010), a utilização da flotação em ETAs pode se aplicar às águas naturais com elevada concentração de algas, tendo em vista que estas reduzem a

sedimentabilidade dos flocos. Em contrapartida, estas unidades exigem a utilização de equipamento para geração de microbolhas, o que aumenta o consumo de energia elétrica na ETA, além de que, é necessário que as unidades fiquem cobertas e a operação seja realizada por colaboradores qualificados, o que condiciona o uso desta unidade de tratamento.

Na filtração por membranas filtrantes, esta pode envolver os processos de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa (Heller; Pádua, 2010), sendo o tamanho da abertura de filtração das membranas decrescente no sentido da microfiltração para a osmose reversa, em que cada membrana é utilizada para um determinado propósito de tratamento (Miranda; Monteggia, 2007). Heller e Pádua (2010) mencionam que o processo de funcionamento deste método consiste no bombeamento do afluente para módulos que contém as membranas, assim, ocorre a passagem da água através das membranas, ficando retidos nestas apenas os contaminantes.

Conforme Miranda e Monteggia (2007) e Heller e Pádua (2010), a filtração por membrana possui as vantagens de ocupar menor espaço nas estações de tratamento, reduzir a produção de lodo, por não haver o uso de coagulantes, e a quantidade de unidades utilizadas para o processo de clarificação da água, além de gerar a possibilidade de remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos com maior eficiência se comparada com as técnicas tradicionais de tratamento de água. Entretanto, as principais desvantagens da utilização desta tecnologia são a possibilidade de obstrução dos poros devido a presença dos sólidos em suspensão (Miranda; Monteggia, 2007), mão de obra especializada para a operação da ETA com a utilização desta tecnologia (Heller; Pádua, 2010), aumento no consumo de energia elétrica devido às pressões aplicadas no tratamento e altos custos para a aquisição das membranas (Libânio, 2010).

3.5.3 Tratamento alternativo

Os sistemas simplificados de tratamento de água, de acordo com Lima e Rollemberg (2020), utilizam processos de baixo custo em que frequentemente são utilizados recursos naturais. No Brasil existem diversas regiões, especialmente as localizadas em áreas rurais, onde não há abastecimento de água, sendo de suma importância os sistemas de tratamento de água simplificados. Ainda, de acordo com Lima e Rollemberg (2020) e Heller e Pádua (2010), o tratamento simplificado, assim como o convencional, deve ter como resultado a obtenção da água dentro do padrão de potabilidade, ainda que sejam utilizados processos com menores níveis tecnológicos.

Existem diversos exemplos acerca de soluções alternativas no sistema de abastecimento. Para o sistema de captação alternativo, pode ocorrer a utilização de poço e água de chuva; na etapa de tratamento, poderiam ser utilizados coagulantes naturais ou desinfetantes a base de cloro; quanto à reservação podem ser utilizadas cisternas e pequenos reservatórios públicos; e quanto aos sistemas de distribuição se fazem presentes o chafariz e as torneiras públicas (Heller; Pádua, 2010).

Além de que, ainda quanto ao tratamento de água alternativo, segundo Lima e Rollemberg (2020), considerando um sistema convencional de tratamento, com a adoção de técnicas alternativas, para a etapa de coagulação e floculação podem ser utilizadas espécies naturais, como a *moringa oleifera* e o tanino vegetal. Na etapa de filtração podem ser adotados os filtros de areia, enquanto na desinfecção, esta pode ser realizada por meio de radiação solar ou por clorador de pastilha.

Cabe salientar que independentemente do tratamento adotado, este deve conferir qualidade e potabilidade da água, levando em consideração que esta é de fundamental importância para a manutenção da vida, estando intrinsecamente relacionada à qualidade de vida da população.

3.6 Coagulação

O processo de coagulação no tratamento de água, antecedendo a etapa de filtração, surgiu no final do século XIX nos Estados Unidos da América (Libânio, 2010). Segundo Oliveira e Luz (2001), o processo de coagulação é a etapa inicial de desestabilização das partículas suspensas e coloidais dispersas na água (estas apresentam carga predominantemente negativa), no qual o coagulante é adicionado à água antes ou no decorrer de uma forte agitação. Desta forma, a coagulação consiste em uma série de reações físicas e químicas, que resultam na eliminação das forças que mantêm dispersas as partículas presentes na água (Miranda; Monteggia, 2007).

Portanto, o processo de coagulação tem como objetivo elevar a velocidade de sedimentação das partículas presentes na água e ocorre na unidade de mistura rápida (métodos mecanizados ou hidráulicos) da ETA, sendo a coagulação uma etapa utilizada em quase todas as tecnologias de tratamento, exceto na filtração lenta (Libânio, 2010).

3.6.1 Mecanismos da coagulação

De acordo com Libânio (2010), a desestabilização das partículas na coagulação permite que elas se aproximem, superando a barreira de energia causada pelos potenciais elétricos existentes. Desta maneira, quando o coagulante é adicionado na água, podem ocorrer quatro tipos de mecanismos de desestabilização das partículas, sendo estes: mecanismo da compressão da dupla camada, adsorção-desestabilização, varredura e formação de pontes químicas.

O mecanismo da compressão da dupla camada é desencadeado ao utilizar coagulantes contendo especialmente íons com alta carga positiva. Os íons atravessam a camada difusa e a camada compacta das partículas, reduzindo o potencial zeta (relacionado com o fenômeno da eletroforese) e a espessura da dupla camada, o que permite a aproximação das partículas. Já a adsorção-desestabilização, é um mecanismo que ocorre logo após a dispersão do coagulante na água, conforme pH do meio, o que pode ocasionar a formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, as quais podem ser adsorvidas na superfície das partículas, causando sua desestabilização (Libânio, 2010).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), no mecanismo de varredura ocorre a precipitação de hidróxido de alumínio e ferro, dependendo da quantidade de coagulante utilizada, da concentração de determinados tipos de íons e do pH da água. Os precipitados permitem a formação de flocos desestabilizados que sedimentam à velocidade superior a dos flocos formados por outros mecanismos. Já quanto à ocorrência de pontes químicas, estas ocorrem quando são introduzidos polímeros de longas cadeias moleculares no processo, que servem como pontes entre a superfície à qual estão fixados e outras partículas presentes no meio.

3.6.2 Fatores que intervêm na coagulação

Dentre os fatores intermitentes da coagulação, Libânio (2010) menciona diversos, como tipo de coagulante, pH e alcalinidade da água bruta, natureza e a distribuição dos tamanhos das partículas que ocasionam cor e turbidez, uniformidade na aplicação dos produtos químicos na solução líquida, presença de íons, concentração e maturidade da solução coagulante, temperatura da água, gradiente de velocidade e tempo de agitação na unidade de mistura rápida.

Vale mencionar que a fim de proporcionar melhorias ao processo de coagulação, podem-se adicionar polímeros (composto orgânico de longa cadeia, formado por monômeros), como auxiliares ao processo, sejam sintéticos ou naturais, que podem ocasionar, por exemplo, a redução da dosagem do coagulante primário utilizado no tratamento proposto (Di Bernardo;

Dantas, 2005). Ademais, os polímeros podem ser catiônicos, aniônicos e não iônicos, além de não produzirem flocos volumosos e gelatinosos (Richter, 2009).

É de suma importância o controle acerca dos fatores que possam interferir no processo de coagulação, tendo em vista que, de acordo Oliveira *et al.* (2021), em seu estudo acerca dos fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água, ao analisarem 20 ETAs, observaram que, nas estações de pequeno porte, as despesas com coagulante representaram 61% dos gastos com produtos químicos.

3.6.3 Coagulantes

Conforme Heller e Pádua (2010), os coagulantes são substâncias que ao serem adicionadas no tratamento de água, formam espécies hidrolisadas que reagem quimicamente ou atuam na superfície das impurezas. Desta maneira, ocorre a redução das forças repulsivas das impurezas no meio aquoso, facilitando a remoção destas nas etapas posteriores do tratamento. Ressalta-se que a quantidade de coagulante é determinada pelas características químicas da água bruta (Lima Júnior; Abreu, 2018). Além disso, as características (densidade e resistência) dos aglomerados formados (flocos) no processo de tratamento podem sofrer influências devido a diversos fatores, como a quantidade e tipo do coagulante utilizado no tratamento (Dalsasso; Sens, 2006).

Os coagulantes usualmente empregados nas ETAs são o hidróxi-cloreto de alumínio, cloreto férrico, sulfato de alumínio, sulfato ferroso clorado e sulfato férrico. No território brasileiro, os coagulantes comumente utilizados são o cloreto férrico e o sulfato de alumínio (Heller; Pádua, 2010). Entretanto, diversos estudos já demonstram a eficiência de coagulantes naturais, como quiabo (Santos *et al.*, 2023; Santos; Rosa; Michelin, 2022), *moringa oleifera* (Oliveira *et al.*, 2018), cacto (Zara; Thomazini; Lenz, 2012), tanino vegetal (Santos Júnior *et al.*, 2020), entre outros.

Segundo Bongiovani *et al.* (2010), em seus estudos sobre os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável, a utilização de coagulantes orgânicos biodegradáveis representa alternativa técnica aos coagulantes convencionais, ofertando benefícios para a saúde pública e para o meio ambiente. Cenário este observado por Santos *et al.* (2023), que analisaram estatisticamente o tratamento de água subterrânea (quanto aos parâmetros pH, cor verdadeira e aparente, turbidez, temperatura e condutividade elétrica) com o uso dos coagulantes *Abelmoschus esculentus* (quiabo) e sulfato de alumínio, associados e separados, e concluíram que não houve diferenças estatísticas significativas entre os

tratamentos, evidenciando a eficácia na utilização de coagulantes naturais quando comparados aos químicos.

3.7 Floculação

A floculação ocorre em um ambiente com menos turbulência (Oliveira; Luz, 2001), sendo um processo físico, em que as partículas desestabilizadas na coagulação se chocam e formam coágulos maiores (flocos), para que posteriormente sejam removidos nas unidades de filtração ou por sedimentação/flotação (Libânio, 2010). Ainda, os ambientes de floculação possuem os floculadores que podem ser mecanizados ou hidráulicos (Miranda; Monteggia, 2007; Valencia, 1972).

Ademais, vale mencionar que todos os fatores envolvidos na coagulação podem interferir na eficiência da floculação. Assim, além da coagulação, o gradiente de velocidade e o tempo de detenção também são fatores determinantes na eficiência do processo (Libânio, 2010).

3.7.1 Mecanismos que intervêm na floculação

(a) Transporte

Segundo Libânio (2010) e Di Bernardo e Dantas (2005), na floculação a interação entre as partículas ocorrem devido a três mecanismos, sendo estes: o movimento browniano (floculação pericinética), as diferenças de velocidade das linhas de corrente do fluido em escoamento (floculação ortocinética) e as distintas velocidades de sedimentação dos flocos (sedimentação diferencial).

O mecanismo de floculação pericinética é impulsionado pela gravidade e pelo movimento browniano (aleatório) das partículas coloidais com dimensões inferiores a 1 micrômetro, sendo o início desta fase na mistura rápida. Enquanto, no mecanismo de floculação ortocinética, a introdução de energia externa é requerida para promover a aglutinação das partículas desestabilizadas e dos microflocos. Já a sedimentação diferencial, se dá devido a desuniformidade de volume e densidade dos flocos formados, o que confere diferentes velocidades na sedimentação, ocasionando colisões durante o movimento descendente na unidade de decantação, resultando na formação de flocos mais densos (Libânio, 2010).

(b) Agregação e ruptura de flocos

Di Bernardo e Dantas (2005) afirmam que os encontros entre as partículas proporcionam agregação e formação de flocos, sendo o aumento no período de floculação fator resultante no aumento da probabilidade de encontros. Todavia, em situações de agitação excessiva, as forças de cisalhamento podem ocasionar a desintegração dos flocos e, após certo tempo de floculação, a erosão destes.

Assim, os mecanismos de transporte da floculação citados anteriormente, levam a dois processos: a agregação e a ruptura dos flocos. Dependendo da coagulação, da floculação e das condições da água, os flocos crescem até atingir um tamanho limite, no qual as tensões de cisalhamento se igualam às forças de aglutinação. Devido a tal fato, pode ocorrer a predominância das forças hidrodinâmicas, que tendem a romper os flocos, sendo que, uma vez rompidos, torna-se improvável que se formem novamente nas mesmas condições. Desta forma, com exceção de situações peculiares, pode haver aumento na eficiência da floculação quando o tempo de detenção é elevado e os gradientes de velocidade aplicados são de menor magnitude (Libânio, 2010).

3.7.2 Floculantes

Geralmente o floculante é adicionado após o coagulante (Oliveira; Luz, 2001), além de que, estes são diversos e podem ser químicos ou naturais. Quanto aos químicos, tem-se sulfato de alumínio, polieletrólitos (Miranda; Monteggia, 2007), poliacrilamida, ácido poliacrílico (Singh *et al.*, 2000), entre outros. Quanto aos naturais, se tem quitosana, *moringa oleifera* (Lima; Rollemberg, 2020), cacto (Choque-Quispe *et al.*, 2018; Zara; Thomazini; Lenz, 2012), quiabo (Santos; Rosa; Michelan, 2022), entre outros.

Apesar de diversos estudos acerca de coagulantes/floculantes, sejam eles químicos ou naturais, evidenciarem a eficiência de ambos, segundo Lima Júnior e Abreu (2018), a difusão dos coagulantes e floculantes advindos de matérias-primas naturais biodegradáveis, abundantes na natureza, estão sendo cada vez mais propagados por possuírem benefícios quando comparados aos coagulantes químicos, como produzirem menor volume de lodo, não serem corrosivos, serem solúveis em água, serem efetivos numa ampla faixa de pH e possuírem baixa toxicidade.

3.8 Decantação

Heller e Pádua (2010) mencionam que a decantação é resultado da ação da gravidade sobre as impurezas na água, que favorece a sedimentação destas no fundo dos decantadores, ocasionando a clarificação da água. Nesse sentido, Souza (2007) cita a decantação como um processo dinâmico que envolve a separação das partículas sólidas que estão suspensas na água. Desse modo, as partículas tendem a se acumular no fundo dos decantadores com velocidade em função do peso da partícula.

As unidades de decantação são projetadas considerando a taxa de aplicação superficial, a qual é diretamente correlacionada à velocidade de sedimentação das partículas suspensas na água, sendo determinada ao dividir a vazão afluyente ao decantador por sua área em planta (Heller; Pádua, 2010).

Dessa maneira, os decantadores são tanques que recebem a água floculada e diminuem a sua velocidade para permitir a decantação dos flocos (Souza, 2007), sendo a eficiência desta etapa reduzida quando ocorre baixo funcionamento das unidades que a precedem, como as etapas de coagulação e floculação, devido a baixa concentração de partículas na água bruta ou por problemas operacionais (Heller; Pádua, 2010).

Além disso, no tratamento de água convencional, de modo geral, são gerados dois tipos de resíduos, sendo estes, o resíduo sólido gerado nos decantadores ou flotores com ar dissolvido, e o resíduo oriundo da lavagem dos filtros (Souza, 2007). Contudo, vale ressaltar que as propriedades dos resíduos produzidos durante o tratamento de água oscilam de acordo com o método utilizado para a potabilização, sendo que, em linhas gerais, os resíduos são compostos por água e sólidos suspensos presentes na água bruta, além de substâncias geradas pelos reagentes utilizados ao longo do tratamento (Libânio, 2010), devendo a disposição final desses resíduos ocorrer conforme a realização de análises de viabilidade técnica, ambiental e econômica.

3.9 Filtração

A filtração é um processo de separação de impurezas da água devido a sua passagem por um meio poroso. É um processo físico-químico e, em alguns casos, biológico, como no caso da filtração lenta. Frisa-se que, quando utilizada a filtração lenta, este pode ser o único processo utilizado na cadeia de tratamento de água (Richter, 2009).

3.9.1 Generalidades

Libânio (2010) menciona que as primeiras referências ao processo de filtração provavelmente remontam ao século X a.C., na Índia e na China, quando materiais granulares foram empregados no fundo de poços rasos com o objetivo de melhorar a qualidade da água destinada ao abastecimento doméstico. A primeira descrição conhecida do uso de um sistema de filtração ascendente foi em 1685, pelo médico italiano Lucas Antonius Portius, com o intuito de tornar potável a água para o abastecimento de soldados da guerra Turquia-Áustria. Quanto ao primeiro filtro utilizado no abastecimento público, este foi construído em 1804 na Grã-Bretanha.

Desse modo, os filtros, no sistema de tratamento de água, são as unidades encarregadas por reterem as partículas que restam na água após o processo de decantação, e de maneira geral, são estruturas constituídas por tanque, leito filtrante, camada-suporte, fundo falso, tubulações e acessórios (Souza, 2007).

Assim, os filtros podem ser classificados utilizando diversos critérios, como quanto a taxa de filtração, em que se define a filtração como lenta ou rápida; quanto ao meio filtrante, que pode ser granular ou poroso; quanto ao número de camadas, podendo ser simples ou múltiplas (Libânio, 2010); quanto ao sentido de escoamento, o qual pode ser descendente (fluxo da água filtrada no sentido de cima para baixo) ou ascendente (fluxo da água filtrada no sentido de baixo para cima); quanto a pressão de operação, podendo ser filtros de pressão ou de gravidade, entre outros. Frisa-se que a filtração rápida é aquela em que a taxa de filtração encontra-se entre 120 a 480 m³/m².dia, já na filtração lenta a taxa de filtração se situa entre 2,4 a 9,6 m³/m².dia (Souza, 2007).

Heller e Pádua (2010) mencionam que, para águas com altos teores de sólidos, é possível realizar a associação entre filtros, como o caso da dupla filtração, em que a água coagulada percorre uma unidade de filtração ascendente, seguida por uma unidade de filtração descendente. Ainda, pode-se adotar a pré-filtração antes da filtração lenta, sendo esta técnica

denominada Filtração em Múltiplas Etapas (FiME), a qual utiliza o esquema de filtração com a sequência: unidades de pré-filtração dinâmica em pedregulho, pré-filtro de pedregulho e a unidade de filtração lenta.

Contudo, apesar da qualidade da água bruta representar um dos principais elementos a serem ponderados para a determinação da técnica de tratamento, outros fatores, como porte da instalação, complexidade operacional e custos de operação e implantação, também devem ser considerados, tendo em vista que as diversas técnicas de tratamento de água possuem vantagens e desvantagens (Heller; Pádua, 2010).

3.9.2 Mecanismos integrantes da filtração

Para Di Bernardo e Dantas (2005) e Amirtharajah (1988), os mecanismos responsáveis pela remoção de impurezas na filtração são complexos, sendo influenciados por diversos fatores, como taxa de filtração, método de operação dos filtros e características físicas e químicas das partículas, do meio filtrante e da água.

O processo de filtração ocorre devido à ação dos mecanismos de transporte e aderência, sendo o processo de filtração lenta acrescido do processo de filtração biológica, que é fator determinante para a elevada eficiência na remoção de patógenos nas unidades de filtração lenta. Logo, os mecanismos de transporte podem ser divididos em coagem, sedimentação, interceptação, difusão, forças hidrodinâmicas e impacto inercial (Libânio, 2010), enquanto nos mecanismos de aderência, de maneira geral, atuam as forças de Van der Waals, efeitos eletrostáticos e pontes químicas (Valencia, 1972).

a) Transporte

Os mecanismos de transporte são responsáveis por conduzir as partículas através dos poros do meio filtrante (Di Bernardo; Dantas, 2005), sendo suscetíveis à influência de diversos fatores, como taxa de filtração, temperatura e características do meio filtrante (Libânio, 2010) e podem ocorrer simultaneamente no processo de filtração (Valencia, 1972).

O primeiro mecanismo de transporte e o mais simples é a coagem ou ação de coar, em que se tem a relação entre os grãos que constituem o meio filtrante e os diâmetros das partículas presentes na água (Libânio, 2010), desta forma, com a passagem da água pelo meio filtrante, ocorre a retenção de partículas maiores que os interstícios entre os grãos que constituem o meio filtrante, sendo esta ação desenvolvida principalmente na superfície do filtro (Huisman; Wood,

1974) com as partículas que são capazes de resistir às tensões de cisalhamento produzidas pelo fluxo (Valencia, 1972).

A sedimentação é um mecanismo pelo qual o material particulado em suspensão é depositado sobre os grãos do meio filtrante (Huisman; Wood, 1974). Este mecanismo ocorre devido à velocidade de sedimentação da partícula e a força da gravidade, que resulta na passagem da partícula através das linhas de corrente e sua deposição nos grãos (Amirtharajah, 1988).

No mecanismo de interceptação, de acordo com Valencia (1972), tem-se a redução do espaço disponível entre os grãos, quando o fluido passa pelos poros do meio filtrante, o que resulta em um aumento na velocidade das partículas, que por sua vez, aumenta a energia cinética entre as partículas propiciando a sua aglomeração e, assim, o aumento no seu respectivo tamanho. Desta forma, quando a partícula se movimenta ao longo de uma linha de corrente suficientemente próxima dos grãos do meio filtrante ocorre a sua interceptação (Amirtharajah, 1988) devido ao choque das partículas com os grãos e posteriormente a sua deposição (Libânio, 2010).

A difusão ocorre devido ao movimento browniano, que ocasiona a colisão entre as partículas e as moléculas de água (Amirtharajah, 1988; Di Bernardo; Dantas, 2005). Este mecanismo de transporte atua em toda a profundidade do filtro e independe da taxa de filtração (Huisman; Wood, 1974), além de ser mais expressivo em partículas menores que 1 micrômetro (Amirtharajah, 1988).

Além disso, conforme Valência (1972), o impacto inercial ocorre quando a velocidade e as dimensões da partícula presente no fluido, são suficientemente grandes, para que esta seja influenciada por efeitos inerciais, favorecendo, assim, que a partícula preserve sua trajetória independente das variações da linha de fluxo, resultando em colisões com os grãos do meio filtrante, levando à sua subsequente retenção.

Ademais, devido à laminaridade do escoamento, as forças hidrodinâmicas se originam em decorrência da diferença das velocidades tangenciais à superfície da partícula. Assim, o gradiente de velocidade ocasiona uma diferença de pressão no sentido perpendicular do fluxo, o que conduz a partícula em direção a áreas com velocidades mais reduzidas, promovendo sua deposição sobre a superfície dos grãos (Libânio, 2010). Além de que, segundo Amirtharajah (1988), estas forças estão associadas principalmente à sua interação com o campo de fluido e a geometria da partícula.

b) Aderência

Sendo os mecanismos de aderência predominantemente químicos, se fazem presentes alguns mecanismos, como as forças de Van der Waals, que segundo Libânio (2010), são forças de atração, que podem existir entre partículas de carga igual, opostas ou neutras, sendo seu campo de ação limitado à curtas distâncias. Estas forças são fundamentais no processo de adsorção, e a sua magnitude, assim como a adesão ao meio filtrante, estão relacionadas ao tamanho e a densidade das partículas, que tendem a aumentar com a redução entre a distância das partículas presentes no fluido e os grãos do meio filtrante.

Outro mecanismo de aderência são as forças eletrostáticas, que para Valencia (1972), são determinantes para as circunstâncias de adsorção entre partículas, tendo em vista que as forças eletrostáticas são responsáveis por gerar as interações de atração ou repulsão entre partículas.

Ademais, ainda se fazem presentes nos mecanismos de aderências, as pontes químicas, que ocorrem quando os segmentos estendidos das cadeias poliméricas, que estão aderidas às partículas, são adsorvidos por outras partículas ou pelos grãos do meio filtrante. Assim, o uso de auxiliares de filtração, sejam sintéticos ou naturais, aumentam a capacidade das partículas suspensas se fixarem nas partículas do meio filtrante (Libânio, 2010), além de que, este mecanismo é independente de cargas eletrostáticas (Valencia, 1972).

3.9.3 Meio filtrante

Purchas e Sutherland (2002) mencionam que o meio filtrante é todo material que, durante o funcionamento do filtro, permite a passagem de um ou mais componentes de uma mistura, solução ou suspensão, ao passo que é impermeável aos demais. Assim, para o meio filtrante ser eficaz no processo, este deve apresentar uma combinação de diversas propriedades, como resistência química e mecânica, características de filtração, entre outras.

Di Bernardo e Dantas (2005) citam que é de suma importância o conhecimento das características granulométricas dos materiais que constituem o meio filtrante, para que assim seja possível projetar o sistema de filtração. Assim, para caracterizar os materiais filtrantes, faz-se necessário a determinação do tamanho e da distribuição dos tamanhos dos grãos, obtidos a partir do ensaio de distribuição granulométrica do material. Igualmente, diversas características do meio filtrante podem ser analisadas de forma conjunta, como, tamanho dos grãos, tamanho

efetivo, coeficiente de desuniformidade, forma e geometria dos grãos, porosidade, massa específica, dureza dos grãos e solubilidade em ácido clorídrico e em hidróxido de sódio.

O meio filtrante pode ser composto por camada simples (uma camada filtrante) ou múltiplas camadas (mais de uma camada), em que os materiais que o compõem podem ser diversos, como areia, antracito, granada (Souza, 2007), carvão ativado vegetal, entre outros (Miranda; Monteggia, 2007). Além de que, o meio filtrante apoia-se em uma camada denominada de camada-suporte, que em geral pode ser de pedregulho, seixos rolados ou cascalho. Salienta-se que os filtros de camada dupla, composta por areia e antracito, são os mais utilizados em diversos países, como nas estações de grande porte do Brasil, devido à significativa porosidade do meio que possibilita maior penetração das partículas no meio filtrante (Libânio, 2010).

Além disso, conforme os filtros retêm as partículas no processo de filtração, estes vão aumentando a sua colmatção, devendo ser realizada a sua lavagem (Miranda, Monteggia, 2007). Ressalta-se que, a limpeza retrolavável é corriqueiramente utilizada na filtração rápida, entretanto, Michelin, Sens e Dalsasso (2015), ao compararem a eficiência entre filtração lenta com limpeza retrolavável (FLR) e convencional raspagem do meio filtrante (FLC); quanto a duração da carreira de filtração, concluíram que carreira de FLC era mais duradoura que a do FLR, contudo, o FLR consumia 50 vezes menos tempo na limpeza que o FLC.

Portanto, ao se escolher o método de limpeza, deve-se levar em consideração diversos fatores, tendo em vista que, no estudo de Hymnô, Pizzolatti e Sens (2014), também foi observado que o FLR reduzia a mão de obra quanto a limpeza, contudo, os autores citam que, devido à limpeza por retrolavagem modificar as características do meio filtrante (com a retirada de partículas mais finas do meio), o que pode ocasionar resultados de remoções de cor e turbidez inferiores quando comparado aos resultados de FLC.

3.9.4 Filtração lenta

A utilização dos filtros lentos consolidou-se no século XIX, a fim de reduzir os riscos sanitários ocasionados pelas doenças de veiculação hídrica (Libânio, 2010). De acordo com Heller e Pádua (2010), na filtração lenta, o tratamento da água contempla processo biológico e não há necessidade de utilização de coagulante químico. Assim, a falta da necessidade do uso de coagulante químico e a baixa necessidade de limpeza dos filtros torna a técnica mais simplificada e mais viável, mesmo em regiões mais afastadas.

Pizzolatti *et al.* (2010), utilizaram filtração lenta de areia, em água proveniente de lago, como uma tecnologia de tratamento de água para atender comunidades rurais, na qual, foram obtidas eficiências de remoção de cor e turbidez de cerca de 78% e 81%, respectivamente, o que de acordo com os autores, demonstra o grande potencial de aplicação do sistema no atendimento do consumo de água em comunidades rurais.

Em consonância com Miranda e Monteggia (2007), o filtro lento consiste em um tanque com uma camada superior de água. O mecanismo contém um leito filtrante, dispositivos de regulação e controle do fluxo, e sistema de drenagem. Além disso, na superfície do filtro, tem-se uma película denominada de *schmutzdecke* ou “pele do filtro”, em que a água atravessa antes de percolar o meio filtrante (Figura 1).

Figura 1 - Esquema dos elementos básicos do filtro lento.



Fonte: Adaptado de Souza (2007).

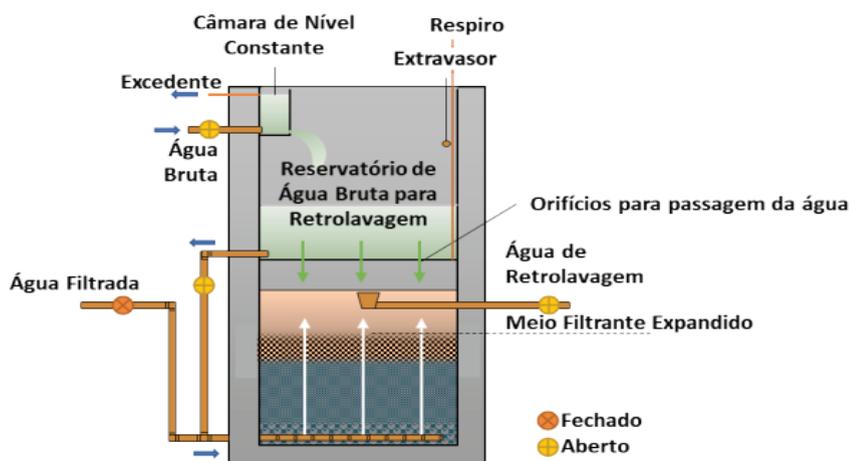
O termo “*schmutzdecke*” é derivado do alemão e significa “película de sujeira”. A presença desta camada se dá devido à ausência da etapa de coagulação, não ocorrendo o mecanismo de aderência no processo de filtração, além de que, as baixas taxas de filtração e a ausência da pré-desinfecção também colaboram com o desenvolvimento da camada biológica (2 a 5 cm de espessura) no topo do leito filtrante (Libânio, 2010).

A camada *schmutzdecke* é composta principalmente por algas, além de protozoários, plâncton, bactérias, diatomáceas e rotíferas. Dessa maneira, as diversas formas de vida presentes na camada realizam a digestão e degradação da matéria orgânica existente na água bruta, ocasionando a remoção na parcela da cor e a retenção das partículas inertes em suspensão devido ao processo de adsorção (Miranda; Monteggia, 2007), sendo uma das maiores vantagens do filtro lento a alta eficiência na remoção de organismos transmissores de doenças (Heller; Pádua, 2010). Destarte, a camada se desenvolve formando um filme biológico em volta dos

grãos que constituem o meio filtrante, o que resulta na purificação da água bruta (Libânio, 2010). Desse modo, a eficiência do filtro lento depende principalmente da camada *schmutzdecke*, tendo a sua maturação de 2 a 4 semanas (Miranda; Monteggia, 2007).

Quanto ao processo de limpeza dos filtros, conforme Heller e Pádua (2010), este pode ocorrer de maneira manual, para o caso de filtros com pequena área em planta, ou de maneira mecanizada, para os filtros com grandes dimensões. Assim, como a retenção das impurezas ocorre com predominância no topo do meio filtrante, pode-se realizar a raspagem de parte do topo para a lavagem, e desta forma, após a lavagem, a camada retirada para o procedimento é devolvida ao filtro. Ou ainda, como alternativa à raspagem, conforme Michelan, Sens e Dalsasso (2015), pode-se realizar a limpeza dos filtros por retrolavagem (Figura 2), em que, o processo de limpeza envolve o retorno de parte da água filtrada através de contrafluxo, ocasionando a expansão do meio filtrante, removendo assim as impurezas com menor densidade.

Figura 2 - Esquema de filtro lento retrolavável durante a retrolavagem.



Fonte: Brasil (2019).

Além de que, é denominado de “duração da carreira de filtração” o intervalo de tempo entre as limpezas do filtro, que no geral, na filtração lenta, é superior a dois meses. Albuquerque *et al.* (2019) apontam que, após a limpeza, ocorre novamente o período de amadurecimento do filtro, com a formação da nova camada biológica, sendo que este processo de amadurecimento leva alguns dias ou semanas.

É importante ressaltar que para a implementação de ETAs com filtração lenta, faz-se necessário espaços físicos grandes considerando a baixa taxa de filtração dos filtros, o que pode tornar dificultosa a construção destes em áreas urbanas densamente povoadas. Todavia,

considerando-se a vastidão do território brasileiro e a grande necessidade de água potável em municípios com menor densidade populacional, como as comunidades rurais, a filtração lenta é uma alternativa com potencial de implantação, desde que a água bruta possua características favoráveis para o uso da técnica (Heller; Pádua, 2010).

Para Libânio (2010), existem também outros fatores que devem ser considerados para a implantação da filtração lenta, que interferem no desempenho da técnica, como as características da água bruta e do meio filtrante, a duração das carreiras de filtração devido ao amadurecimento da camada biológica, profundidade do meio filtrante, entre outros.

Albuquerque *et al.* (2019), ao realizarem uma revisão bibliográfica acerca da eficiência da filtração lenta, salientam que diversos estudos mostram que a tecnologia ainda é aplicável e viável, seja do ponto de vista tecnológico ou econômico. Desta forma, Silva *et al.* (2018) analisaram a eficiência de um sistema de filtração lenta com britas e manta de bidim, para a remoção de *Escherichia coli*, turbidez e sólidos totais da água em nascente localizada no município de Passabém em Minas Gerais. O filtro lento mostrou-se eficiente para o tratamento da água com relação aos parâmetros analisados, principalmente quanto a remoção de *Escherichia coli*, com remoções de até 100%.

No estudo de Oliveira Neto, Souza e Sens (2020), no desenvolvimento e avaliação de um sistema de tratamento de água de lago utilizando dois filtros lentos retrolaváveis, um composto com camada única (areia) e outro composto de dupla camada (areia e carvão ativado granular), observaram remoções de turbidez e cor aparente (superiores a 90%), além de remoções de outros parâmetros, como coliformes totais (superior a 70%), *Escherichia coli* (superior 90%), clorofila *a* (superior a 85%), entre outros.

Além disso, Vu e Wu (2022) avaliaram a remoção de micropoluentes em águas subterrâneas utilizando filtro lento de areia revestida com óxido de grafeno em escala de bancada, em que foi possível observar adsorção de atrazina e atenolol de águas subterrâneas de forma efetiva.

Desta forma, é possível observar que independentemente do tipo de água ou da composição do filtro, estudos mostram que a filtração lenta possui eficiência, sendo uma proposta que confere melhoria da qualidade da água.

3.10 Carvão comercial ativado e biocarvão

Segundo Richter (2009), a remoção de matéria orgânica em suspensão no processo de filtração é influenciada pelo tamanho dos grãos e vazios no leito filtrante, o qual pode ser

constituído por diversos materiais. No cenário do uso de carvão no tratamento de águas, de maneira convencional e mais difundida ocorre o uso do carvão comercial ativado e como meio alternativo em ascensão o uso do biocarvão.

O carvão ativado é membro da família de carbonos, de fontes orgânicas e se diferenciam de acordo com o processo de obtenção (Reinoso; Marsh, 2006). Possui elevada área superficial e estrutura porosa, o que o torna um adsorvente universal para a remoção de vários contaminantes no tratamento de águas. Os principais materiais utilizados para a produção do carvão ativado em escala comercial são as madeiras de eucalipto e de pinus, e o endocarpo do coco da baía (Werlang *et al.*, 2013).

Kosheleva, Mitropoulos e Kyzas (2019) citam que a preparação do carvão ativado é constituída por duas etapas principais, sendo estas, a carbonização da matéria-prima carbonácea (em atmosfera inerte e com temperaturas abaixo de 800 °C) e a ativação de material carbonizado. Desta forma, é possível converter todos os materiais carbonáceos em carvão ativado, entretanto, as propriedades do produto final variam de acordo com o tipo de agente ativador, a natureza da matéria-prima utilizada, e as condições de carbonização e ativação.

Frisa-se ainda que, quanto à etapa de ativação do carvão, esta pode ser física ou química (González-García, 2018). A ativação física se dá por meio de CO₂, vapores de água ou ambos; já a ativação química utiliza agentes ativantes, como hidróxidos de metais alcalinos, ZnCl₂, H₂SO₄ e H₃PO₄ (Borges *et al.*, 2003).

De acordo com Chen *et al.* (2011) e Thompson *et al.* (2016), apesar dos carvões ativados serem eficazes na remoção de poluentes, ocasionalmente o seu uso é restrito devido ao custo elevado. Além de que, conforme Borges *et al.* (2003), a oferta desse produto enfrenta desafios diante da demanda crescente em face do seu amplo mercado consumidor, que abrange desde o fornecimento de água potável até a indústria farmacêutica, levando à necessidade de importação. Neste cenário, surgem soluções alternativas, que são ecológicas e de menor custo, como o uso do biocarvão, não submetido a ativação química ou física (Thompson *et al.*, 2016).

Conforme Lehman e Stephen (2009), biocarvão ou *biochar* é um tipo de carvão, rico em carbono, produzido a partir da decomposição térmica da matéria orgânica em temperaturas relativamente baixas. Os materiais para a sua produção são diversos, como o bagaço de laranja (Carvalho, 2018), bagaço de cana-de-açúcar, casca de coco verde, casca de coco seca, sabugo de milho, lodo de esgoto (Santos *et al.*, 2022), entre outros. Além disso, vale mencionar que o biocarvão também pode ser ativado com a realização da ativação física ou química (Panwar; Pawar, 2020).

No processo de degradação dos materiais orgânicos carbonáceos (biomassa), a pirólise é uma das técnicas utilizadas, a qual consiste na decomposição térmica da biomassa devido ao calor em um ambiente com ausência de oxigênio, resultando na produção de produtos, como carvão, bio-óleo e gases. Além disso, os métodos de pirólise podem ser carbonização, convencional, rápida, líquido-*flash*, gás-*flash* e hidropirólise (Pandey, 2008), como ilustrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros para os tipos de pirólise.

Parâmetros	Carbonização	Convencional	Rápida	Líquido- <i>Flash</i>	Gás- <i>Flash</i>	Hidropirólise
Temperatura (°C)	402	602	652	< 652	< 652	< 502
Taxa de aquecimento (°C/s)	Muito baixa	Baixa	Alta	Muito alta	Muito alta	Alta
Tempo de residência	Dias	5 - 30 min	0,5 - 5 s	< 1 s	< 1 s	<10 s
Produtos	Carvão	Óleo, gás e carvão	Bio-óleo	Bio-óleo	Produtos químicos e gás	Bio-óleo

Fonte: Adaptado de Pandey (2008).

Ademais, de acordo com Pandey (2008), a biomassa é uma associação de hemicelulose, celulose, lignina e pequenas quantidades de extrativos, que são pirolisadas em diferentes taxas de aquecimento. Quanto à produção de produtos devido à pirólise da biomassa, o rendimento destes está relacionado às condições do processo, como temperatura, taxas de aquecimento e tempo de residência. Portanto, como neste processo variam diversos fatores, torna-se possível a geração de diversos produtos, sendo a pirólise convencional mais promissora para a produção de carvão.

3.11 Caracterização do carvão comercial ativado e do biocarvão

Para a caracterização de materiais, existem diversas possibilidades que proporcionam a demonstração quanto a sua funcionalidade e aplicabilidade, como a técnica *Brunauer, Emmett e Teller* (BET) que fornece informações sobre a área superficial, que conforme Costa Junior (2014), torna possível a obtenção do gráfico de isoterma de adsorção, sendo este um fator caracterizador do material, através do fenômeno de adsorção por meio de um gás à determinada

pressão relativa, que forma uma monocamada de cobertura na superfície do material analisado, sendo, portanto, possível conhecer a porosidade e área superficial do material em estudo devido à realização deste procedimento.

Também se têm a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que fornece a imagem estrutural da superfície da amostra, sendo possível a inspeção da superfície do material e a obtenção de informações sobre a sua natureza. Assim, o feixe de elétrons no Microscópio Eletrônico de Varredura, além de produzir elétrons secundários, também gera raios X com comprimentos de onda específicos, que podem auxiliar na identificação da composição elementar do material em análise (Shackelford, 2008). Ademais, essa técnica é utilizada em diversas áreas de conhecimento, como nas análises de carvões, a fim de possibilitar a detecção do tamanho e existência de poros no material (Costa Junior, 2014).

Quanto à análise por Difração de Raios X (DRX), esta permite identificar e caracterizar a estrutura cristalina do material, além de realizar medição dos espaçamentos interplanares na estrutura cristalina (Shackelford, 2008). Como o procedimento envolve direcionar um feixe de raios X nos planos cristalinos do sólido, essa interação com os átomos desencadeia a difração, o que resulta em um padrão característico para cada substância. Assim, a análise pode ser empregada para determinar a “digital” do biocarvão e do carvão ativado comercial (Carvalho, 2018).

Já no decorrer da Análise Termogravimétrica (TGA), são obtidos os termogramas que fornecem informações sobre as decomposições poliméricas. Desta forma, têm-se os padrões de decomposição, que são característicos de cada tipo de polímero, tornando possível a identificação destes. Nesta análise a massa de uma amostra, em uma atmosfera controlada, é monitorada de forma contínua em relação à temperatura ou ao tempo, à medida que a temperatura da amostra é gradualmente aumentada (Skoog; Holler; Crouch, 2019).

Ademais, a Fluorescência de Raio X é uma análise química que utiliza fótons de raio X característicos, que são produzidos pela exposição a fótons de raios X (Shackelford, 2008). Sendo assim, a Espectrometria de Fluorescência de Raios X é uma técnica analítica não destrutiva empregada na obtenção de informações sobre elementos presentes nos materiais analisados (Moura; Castro; Souza, 2020), que possibilita a determinação das proporções dos elementos encontrados nas amostras analisadas (Souza; Alves, 2022).

Desta forma, no cenário de caracterização dos materiais, no trabalho desenvolvido por Carvalho (2018), ao utilizar o bagaço da laranja para a produção de biocarvão, para caracterizar o biocarvão e o carvão comercial ativado utilizado para filtrar águas residuárias, foram utilizados alguns ensaios, como: Analisador de Área Superficial (BET), Microscopia Eletrônica

de Varredura (MEV), Difração de Raios X (DRX) e Analisador Térmico Simultâneo (TGA), a fim de analisar comparação morfológica dos carvões em estudo e assim, correlacionar o desempenho dos carvões no processo de filtração de águas residuárias.

Costa Junior (2014), por sua vez, avaliou o carvão ativado produzido a partir do endocarpo de coco da baía aplicado no tratamento de efluente têxtil, e para a caracterização do material utilizou os ensaios BET e MEV, a fim de determinar as propriedades texturais e a natureza química do material utilizado.

Moura, Casto e Souza (2020), para a caracterização e avaliação de biocarvão produzido a partir de resíduos de indústrias frigoríficas, utilizaram as análises de DRX, TGA e FRX, com o intuito de avaliar as propriedades do material quanto ao processo de geração de energia.

Souza e Alves (2022), para realizar a caracterização química de biocarvões produzidos a partir de bio sólido e bagaço de cana de açúcar, utilizaram a análise FRX para a determinação da composição química dos materiais, com o propósito de analisar sua viabilidade de uso no solo.

Dors (2022), ao utilizar o biocarvão advindo de alguns materiais, como a casca de banana, para analisar a remoção de zinco, utilizou diversos métodos de caracterização do biocarvão, dentre eles o de Espectômetro de Fluorescência de raio X por energia dispersiva, visando a obtenção da análise dos elementos químicos (Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, Pb, S, Zn) presentes nas amostras, com o intuito de avaliar a segurança do biocarvão produzido para a uso na adsorção de metais em soluções aquosas.

Portanto, tendo em vista a aferição de diversos parâmetros acerca da qualidade da água, a realização de análises de caracterização proporciona uma análise mais ampla acerca dos materiais avaliados.

3.11.1 Analisador de Área Superficial (BET)

Conforme Kalinke (2015), os processos de adsorção que ocorrem na superfície de materiais que passam por processos térmicos, como pirólise, podem ser afetados significativamente devido ao aumento da área superficial e porosidade do material. Portanto, na análise utilizando o método BET para o alcance de informações sobre a área superficial, torna-se possível a obtenção do gráfico de isoterma de adsorção, caracterizando o material ao medir sua porosidade e área superficial por meio da adsorção de um gás em pressão relativa, formando uma monocamada na superfície analisada (Costa Junior, 2014).

3.11.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A MEV é empregada para analisar as superfícies dos materiais por meio de feixe de elétrons de diâmetro pequeno (Dedavid; Gomes; Machado, 2007). Assim, o feixe de elétrons gera elétrons secundários e raios X com comprimentos de onda característicos, o que possibilita a identificação da composição elementar do material (Shackelford, 2008), estrutura atômica e morfologia do material em estudo (Dedavid; Gomes; Machado, 2007). Desse modo, devido à análise abranger um conjunto de técnicas o MEV pode ser equipado com o sistema *Energy Dispersive System* (EDS), que permite a análise semi-quantitativa e qualitativa da composição das amostras, utilizando a emissão de raios X característicos (Duarte *et al.*, 2003).

3.11.3 Difração de Raios X (DRX)

Tendo em vista que a difração é o resultado da dispersão da radiação por um conjunto regular de centros de difusão espaçados na mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação (Shackelford, 2008), a análise por Difração de Raios X (DRX) é uma técnica analítica empregada para caracterizar fases cristalinas de diversos materiais (Silva, 2020), consistindo em direcionar um feixe de raios X nos planos cristalinos do sólido, onde sua interação com os átomos provoca a difração, gerando um padrão característico para cada substância (Carvalho, 2018). Conforme Silva *et al.* (2019), quando analisados materiais cristalinos, tem-se a identificação de picos, enquanto, ao se analisar materiais amorfos, obtém-se bandas, dado que, materiais cristalinos difratam mais do que os materiais amorfos, resultando em uma intensidade relativa elevada.

3.12 Cacto palma

Cactaceae é a família de plantas que agrupa os cactos. Destaca-se que já foram identificadas pelos cientistas mais de 1.500 espécies de cactos no mundo, sendo no semiárido brasileiro (Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe) encontrados cerca de 85 espécies. Os cactos são plantas que resistem à escassez de água e em sua maioria apresentam características espinhosa, suculenta e com ausência de folhas. São plantas de cultivo fácil, por meio de semente ou ramo, e se proliferam em sua maioria em ambientes secos, com solos bem drenados, argilosos ou arenosos, assim como em rochas e fendas (Cavalcante; Teles; Machado, 2013).

Neste cenário, tem-se o cacto palma, que é uma espécie de planta da família *Cactacea*. As espécies do cacto palma mais comuns plantadas no nordeste brasileiro são de origem mexicana, denominadas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill, com as variações palma gigante e redonda; e *Nopalea cochenillifera* (L.) com a variação miúda ou doce (Silva; Sampaio, 2015). De acordo com Suassuna (2013), a palma foi introduzida no Brasil no início do século passado por empresários da indústria têxtil, que descobriram que na planta existente no México, ao ser infestada naturalmente pelo inseto cochonilha, a fêmea do inseto produzia o ácido carmínico, que era a matéria prima do corante vermelho conhecido por carmim. Desta forma, os empresários trouxeram a planta para o Brasil, que passou a ser chamada de palma devido à semelhança de seus cladódios com a palma de uma mão humana.

As espécies *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill e *Nopalea cochenillifera* (L.) se diferenciam conforme peso dos cladódios, forma, tamanho, resistência seca, palatibilidade e produtividade (Silva; Sampaio, 2015). Estas espécies também são denominadas de palma forrageira, contêm em média 90% de água e contribuem como suplemento na alimentação animal (Santos *et al.*, 2006).

A palma *Opuntia ficus-indica* (palma gigante) é também denominada como azeda, santa ou graúda. Esta é considerada como a mais resistente e produtiva em regiões secas, entretanto, possui menor valor nutricional, além de ser menos palatável. A planta possui crescimento vertical pouco frondoso e caule pouco ramificado, além de que, os cladódios da planta podem chegar a 50 cm de comprimento, pesar cerca de 1 quilograma, e possuir cor verde fosco e forma sub-ovalada ou oval-elíptica (Silva; Sampaio, 2015).

Quanto às pragas que podem afetar o cacto palma, estas são diversas, como larvas, cochonilha, formigas, gafanhotos, lagartas e roedores, que podem danificar as cactáceas, fazendo-se necessário controle acerca das infestações. Cabe salientar que o plantio da palma ocorre normalmente no terço final do período seco, tendo em vista que no período úmido os solos ficam com alto teor de umidade, o que pode ocasionar apodrecimento dos cladódios devido a contaminação por bactérias e fungos (Santos *et al.*, 2006). Ainda, a colheita do cacto palma, em especial como forragem para os animais, pode ocorrer anualmente ou a cada dois anos (Neves *et al.*, 2020).

3.12.1 Composição química e bromatológica

Conforme Frota *et al.* (2015), a composição química e bromatológica da palma forrageira são variáveis e oscilam de acordo com a espécie, idade, clima, tipo de solo, estação

do ano, disponibilidade de nutrientes, entre outros. Entretanto, de maneira geral, a palma forrageira é rica em carboidrato totais, umidade e em minerais como potássio, magnésio e cálcio, além de apresentar pequena porcentagem de matéria seca, como ilustra o Quadro 3.

Quadro 3 - Composição geral do cacto gênero *Opuntia*.

Gênero	Matéria seca (%)	Teor de água (%)	Carboidratos totais (%)	Cálcio (%)	Potássio (%)	Magnésio (%)	Referência
<i>Opuntia ficus-indica</i> (Gigante)	9,00	91,00	-	6,20	-	-	Silva <i>et al.</i> (2015)
<i>Opuntia ficus-indica</i> (var. Copena)	7,80	92,20	-	5,26	1,90	1,27	Cordova-Torres <i>et al.</i> (2015)
<i>Opuntia ficus-indica</i> (Gigante)	12,63	87,40	84,1	2,20	2,37	0,85	Wanderley <i>et al.</i> (2002)
<i>Opuntia ficus-indica</i> (Gigante)	7,29	92,7	-	2,10	2,78	0,60	Teles <i>et al.</i> (2004)
<i>Opuntia ficus-indica</i> (Gigante)	10,2	-	-	2,78	2,11	-	Santos <i>et al.</i> (2006)

Fonte: Autora (2025).

Devido à diversidade na composição, é possível identificar e determinar outros minerais, como sódio, ferro, fósforo, zinco (Cordova-Torres *et al.*, 2015), além de ser possível a determinação dos teores de sólidos solúveis, acidez titulável, pH, umidade, cinzas, proteína total, fibra bruta, açúcares redutores totais, lipídios (Silva *et al.*, 2015), vitaminas A, complexo B, complexo C, aminoácidos (Nunes, 2011), entre outros, o que evidencia a vastidão de elementos que podem compor a planta, que oscilam de acordo com as particularidades do plantio.

3.12.2 Múltiplos usos

Ao que concerne o plantio do cacto palma no Brasil, ao longo de quase 100 anos de cultivo para forragem nas regiões semiáridas, estima-se área total cultivada de cerca de 600.000 hectares (Moreira *et al.*, 2020). Apesar de no Brasil a planta ser utilizada quase em sua totalidade para a produção de forragem na alimentação animal, esta também já é utilizada para a produção de alimentos humanos e na composição de produtos cosméticos e fármacos (Neves *et al.*, 2020). Conforme Santos *et al.* (2006), para a forragem na alimentação animal, o cacto

palma deve ser combinado com outros alimentos, como milho, capim seco, feno, feijão, entre outros, para aumentar o consumo animal de proteína e matéria seca e dirimir possíveis diarreias que possam ocorrer quando o cacto palma é fornecida isoladamente ou em grande quantidade.

De acordo com Nunes (2011), dentre os múltiplos usos do cacto palma, os frutos e cladódios da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) podem ser utilizados também para a produção de energia através da geração de biogás. Vitt *et al.* (2021) ressaltam que apesar da biomassa do cacto palma ainda ser pouco estudada quanto a sua caracterização e aplicação, estudos já estão sendo desenvolvidos quanto a utilização deste material também na produção de biocombustíveis e bioprodutos (biocarvão, bio-óleo, biogás).

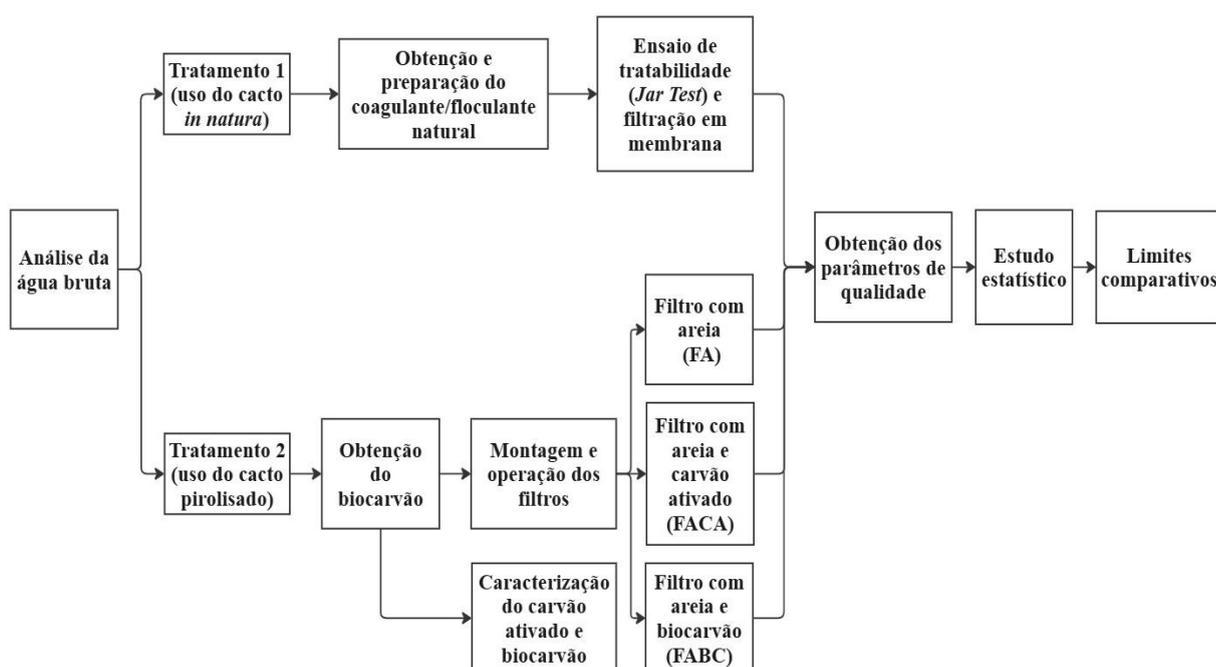
Assim, como já mencionado, no cenário do uso de biocarvão, este já vem sendo avaliado como meio adsorvente para remoção de compostos no tratamento de água (Choudhary; Kumar; Neogi, 2020; Elhleli *et al.*, 2020). Ainda quanto ao tratamento de água, também já se faz presente estudos com a utilização da planta como coagulante natural (Lozano *et al.*, 2015; Goes *et al.*, 2017). Desta forma, torna-se possível observar múltiplos usos e aplicações que a planta possui, que podem ser exploradas pelos pesquisadores.

4 METODOLOGIA

O cacto (*Opuntia ficus-indica*) utilizado no presente estudo foi adquirido na cidade de Salgado, Sergipe. Para a obtenção do coagulante/floculante natural (assim denominado devido a sua ordem de atuação no processo de tratamento de água) e do biocarvão advindos do cacto, montagem e operação dos filtros, assim como a realização dos ensaios de tratabilidade, determinação dos parâmetros físico-químicos e as respectivas análises acerca destes, foi realizada uma pesquisa experimental, dividida em múltiplas etapas (Figura 3) especificadas no decorrer deste capítulo.

Ressalta-se ainda que, o ensaio de tratabilidade desenvolvido envolveu todas as etapas do tratamento de água, a nível de bancada, sendo estas: mistura rápida com coagulação, mistura lenta e decantação.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia adotada.



Fonte: Autora (2025).

O fluxograma ilustra dois caminhos independentes para o tratamento da água subterrânea. O tratamento 1 utilizou o cacto no estado físico natural como coagulante/floculante, no qual foi submetido ao ensaio de tratabilidade e posteriores análises físico-química da água tratada, a fim de comparar com limites preconizados na legislação de potabilidade vigente (Brasil, 2021).

O outro caminho, denominado de tratamento 2 utilizou o cacto como matriz do biocarvão. Como forma de comparar características e desempenho do biocarvão, realizou-se a caracterização deste biocarvão e também do carvão ativado. Os sistemas representativos da filtração lenta foram montados e receberam a denominação de filtro convencional (FA), do filtro com areia e carvão ativado (FACA) e do filtro com areia e biocarvão (FABC). A ideia do filtro FA foi tê-lo como referência para observar o desempenho da proposta em estudo que foi “uso do cacto palma”. Quanto ao FACA, o mesmo foi inserido no estudo pelo fato do carvão ativado (CA) ser um material consolidado na literatura e trazer referências norteadoras para o carvão. Dessa forma, foi observado se o biocarvão (BC) traz ou não semelhanças como meio filtrante em relação ao CA. Para observar similaridade e/ou divergências quanto ao desempenho dos filtros, a água filtrada de todos os filtros foi analisada em termos analíticos.

Por fim, os resultados da água tratada foram comparados com limites preconizados na legislação vigente (Brasil, 2021) e também foi realizado estudo estatístico para observar o desempenho dos filtros, com base nos parâmetros analíticos.

4.1 Água bruta utilizada

A água bruta utilizada para o desenvolvimento do estudo (tratamento 1 e 2) enquadra-se como água subterrânea, sendo coletada por recalque de sistema motor-bomba (Figura 4) do poço tubular número 2, localizado na Universidade Federal de Sergipe (UFS), campus São Cristóvão. A escolha deste poço se deu por este possuir localização próxima ao Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) do Departamento de Engenharia Civil da UFS, sendo este o local da realização do ensaio de tratabilidade da água e desenvolvimento dos procedimentos analíticos.

Figura 4 - Sistema do poço tubular número 2.



Fonte: Autora (2025).

Conforme Damasceno (2010), o poço número 2, perfurado no ano de 2010, é alimentado por aquífero livre constituído por rochas sedimentares, com profundidade de 20,0 m e vazão de 9,0 m³/h. Quanto aos parâmetros físico-químicos, segundo o autor, foram obtidos condutividade elétrica de 203,70 μ S/cm, cor aparente de 40 uH, turbidez de 8,24 uT, dureza total de 30,06 mg/L, ferro total de 0,76 mg/L e pH de 4,72. De acordo com os valores citados, tornou-se possível observar que os parâmetros turbidez e pH, estavam fora do preconizado na legislação vigente no período da análise assim como em Brasil (2021).

Destaca-se que, Lima (2020a), avaliou a eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencionais e não convencionais, ao utilizar a água bruta do referido poço em seus estudos, obtendo para tal temperatura média de 26,6°C, valores de pH entre 5,54 e 7,50, cor aparente média de 38 uH, turbidez média de 3,29 uT e condutividade elétrica média de 228,9 μ S/cm, sendo possível observar alguns desses intervalos de monitoramento fora do preconizado por Brasil (2021).

Além disso, Santos, Rosa e Michelan (2022), também utilizaram em seus estudos a água subterrânea mencionada e observaram que em todas as campanhas analisadas a cor aparente foi superior a 15 uH, e em 50% das campanhas a turbidez esteve acima de 5 uT, ficando acima dos valores permitidos por Brasil (2021). Portanto, foi observado que a água bruta utilizada no presente estudo necessitava passar por tratamento de água, para o posterior consumo humano.

Desse modo, com base nos estudos supracitados anteriormente, observa-se que a água do referido poço necessitava passar por tratamento, tendo em vista a qualidade insatisfatória para fins potáveis conforme os parâmetros avaliados.

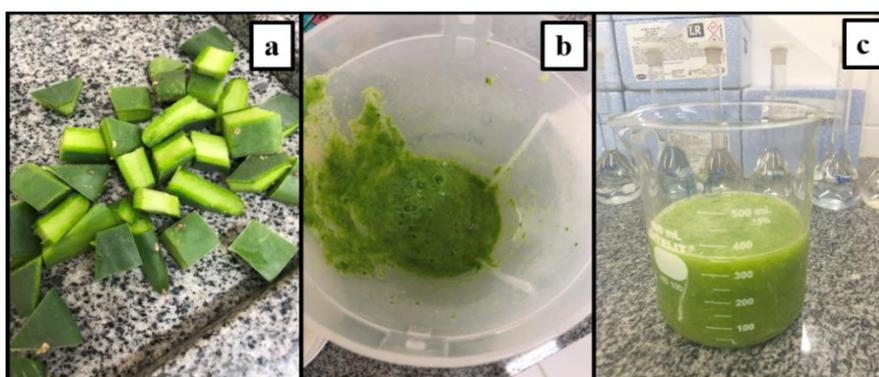
4.2 Obtenção e preparação do coagulante/floculante natural

Esta etapa fundamentou-se nos melhores resultados encontrados por Santos, Rosa e Michelan (2024) em estudo preliminar pertencente à atual dissertação, na qual avaliaram o tratamento de água subterrânea utilizando o cacto como coagulante/floculante natural, em três situações: cacto com água destilada, cacto com NaCl e cacto com NaOH. Desta forma, como a utilização do cacto com água destilada apresentou valores de remoção intermediários e sendo este o método mais simplificado dentre os adotados, foi a metodologia escolhida para dar seguimento ao estudo, tendo em vista que dentre os objetivos dos tratamentos alternativos se buscam propostas que atendam àqueles (comunidades rurais) mais aquém ao abastecimento seguro de água de maneiras mais simplificadas.

Assim, para a obtenção e preparação do coagulante/floculante natural, utilizando os cladódios secundários da planta, foram retirados os espinhos e higienizada a superfície do cacto com água potável. Após isto, o material foi cortado (Figura 5a) e liquidificado (Figura 5b). Devido à consistência do material liquidificado, ocorreu o acréscimo de água destilada para facilitar o processo de liquidificação, no qual, foi utilizada a quantidade de 10 mL para cada 75 g de cacto (Zara; Thomazini; Lenz, 2012; Lima, 2020b).

Além disso, foram adotados 2,5 mL de água destilada para cada 1g de cacto liquidificado, sendo essa mistura homogeneizada em agitador magnético (Figura 5c) por 30 minutos, seguindo a metodologia adaptada de Zara, Thomazini e Lenz (2012). Ainda conforme os autores, o material resultante da homogeneização foi armazenado sob refrigeração conforme ocorriam os ensaios no equipamento *Jar Test*, sendo o coagulante/floculante preparado uma vez por mês.

Figura 5 - Cacto cortado e higienizado (a), cacto triturado em liquidificador (b) e cacto com água destilada após homogeneização em agitador mecânico (c).



Fonte: Autora (2025).

4.3 Ensaio de tratabilidade

Este ensaio foi desenvolvido no equipamento *Jar Test* (marca PoliControl, com 3 jarros), para simular as etapas da estação de tratamento de água a nível de bancada, utilizando 2 L de água bruta em dois jarros do equipamento. Destarte, para a mistura rápida foi empregada a rotação de 150 rpm, durante tempo de 2 minutos, para a dispersão do coagulante/floculante natural. Transcorrido este tempo, ocorreu a mistura lenta, com rotação reduzida para 30 rpm, durante 15 minutos (Zara; Thomazini; Lenz, 2012; Lima, 2020b). Na decantação, foi utilizado o tempo de 30 minutos, sem rotação (Santos *et al.*, 2020).

O equipamento teve dois dos seus três jarros preenchidos com água bruta e mesma dosagem de coagulante/floculante natural. Após a finalização da etapa com *Jar Test*, foi retirada uma alíquota de água decantada para aferição dos parâmetros cor aparente, pH, turbidez, temperatura e DQO. Em seguida, a alíquota de água passou por filtração em membrana com porosidade de 45 µm e bomba a vácuo, para aferição dos parâmetros cor verdadeira, turbidez e ferro total. Salienta-se que foram aferidos para a água bruta os parâmetros cor aparente e verdadeira, pH, turbidez, temperatura, ferro total e DQO.

4.4 Obtenção e preparação do biocarvão

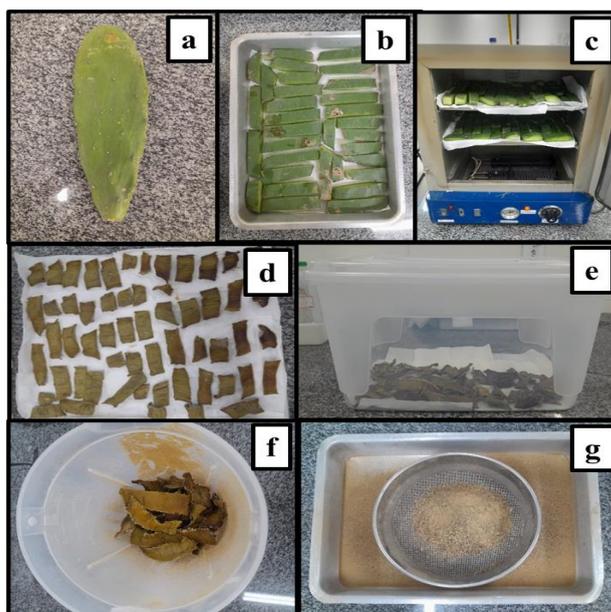
4.4.1 Preparação do cacto para o processo de pirólise

A metodologia utilizada para obtenção e preparação do biocarvão advindo do cacto foi desenvolvida a partir da adaptação metodológica proposta por Carvalho (2018), tendo em vista a ausência de informações quanto à preparação do biocarvão proveniente do cacto para uso deste como meio filtrante. No trabalho de referência, o material utilizado para a obtenção do biocarvão foi o bagaço da laranja pêra, sendo este um material com teor alto de umidade, tendo cerca de 84,47% de umidade, conforme Goes *et al.* (2023), assim como o cacto, de acordo com o Quadro 3.

Portanto, quanto à preparação do cacto (Figura 6a) para o processo de pirólise, o cacto foi pesado e cortado com largura de aproximadamente 2 cm (Figura 6b), para que, posteriormente, este fosse alocado na estufa. Seguindo a metodologia de Riss *et al.* (2022), o cacto cortado foi disposto na estufa por 24h à temperatura de 60°C (Figura 6c – antes e Figura 6d – depois). Após isto, o material foi pesado e armazenado em recipiente de plástico (Figura 6e) para subsequente trituração com o auxílio de liquidificador (Figura 6f). Após as etapas

citadas, seguiu-se a metodologia adaptada de Carvalho (2018), em que, o material triturado foi peneirado com peneira de 0,85 mm de abertura (20 *mesh*), com o intuito de homogeneizar o material (Figura 6g).

Figura 6 - Cacto utilizado no processo (a), material cortado (b), cacto acondicionado na estufa (c), material após o processo de secagem em estufa (d), cacto armazenado em recipiente de plástico (e), material acondicionado em liquidificador (f) e cacto liquidificado e peneirado (g).



Fonte: Autora (2025).

Ressalta-se que nesta etapa foi identificada umidade em torno de 93%, tendo em vista que para cada 4,9 kg de cacto *in natura*, após o processo de estufa, quantificou-se peso de massa seca em torno de 0,353 g, e após peneiramento de 0,237 kg.

4.4.2 Processo de pirólise

Para a etapa de carbonização no equipamento denominado mufla, também foi seguida a metodologia de Carvalho (2018), em que foi utilizada a temperatura inicial de 550 °C. Após atingir a temperatura determinada, o material permaneceu 60 minutos no equipamento. Ressalta-se que o processo foi conduzido em atmosfera isenta de oxigênio. Desta forma, completado o tempo supracitado aguardou-se no mínimo 5 minutos para assim, abrir a mufla, e posteriormente encaminhar ao dessecador (isenção de umidade). Após isso, o material foi pesado em balança de precisão, com a finalidade de verificar o rendimento após passar pela mufla. Deste modo, foram realizados 4 ensaios, com resultados ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados obtidos no processo de pirólise.

Ensaio	Temperatura (°C)	Tempo de permanência (minutos)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimento (%)
1	550	60	25,0	8,70	34,8
2	450	40	25,0	8,87	35,5
3	550	30	25,0	8,96	35,8
4	450	30	25,0	8,81	35,2

Fonte: Autora (2025).

Destarte, tendo em vista os resultados, para a produção do biocarvão (Figura 7), conforme Tabela 1, dado os rendimentos em torno de 35% para os 4 ensaios realizados, foi adotada a metodologia que consistia no uso da temperatura de 450 °C, com taxa de aquecimento de aproximadamente 15 °C.min⁻¹ (pirólise convencional) e com tempo de permanência em mufla de 30 minutos, tendo em vista o intuito de facilitar a implementação da produção de biocarvão em comunidades rurais, sendo estas áreas, de maneira geral, possuintes de infraestrutura limitada, levando em consideração que temperaturas mais baixas e tempos menores de permanência, dada eficiências similares, tendem a simplificar a operação e controle do processo.

Figura 7 - Biocarvão proveniente do cacto.



Fonte: Autora (2025).

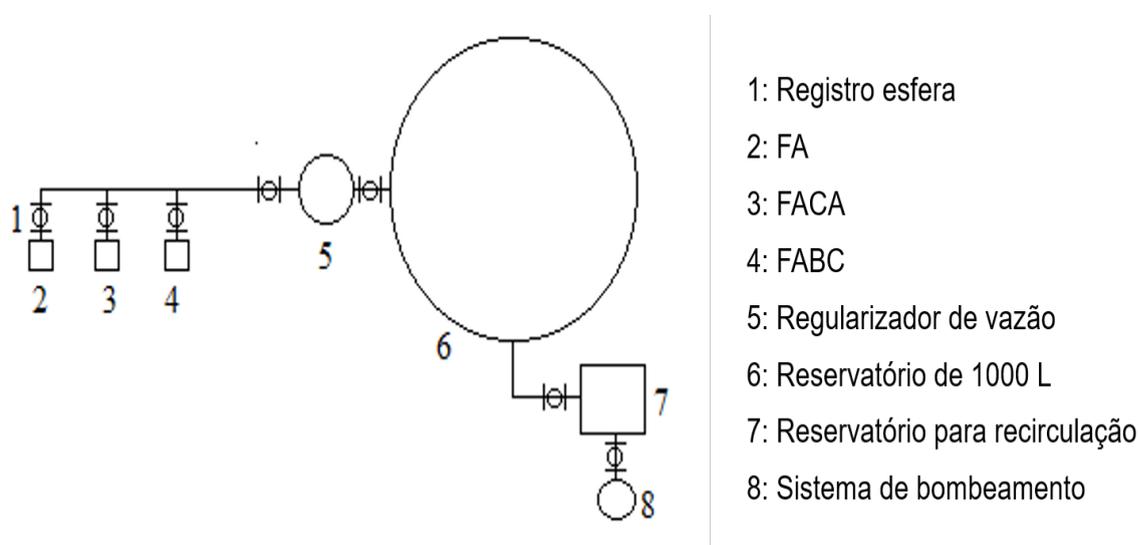
4.5 Sistema hidráulico utilizado

Empregou-se a infraestrutura hidráulica concebida por Lima (2020a), a qual é alimentada pela extração de água subterrânea do poço designado como Poço 2 na Universidade Federal de Sergipe (UFS). Esta infraestrutura inclui, a princípio, um sistema de bombeamento com reservatório enterrado, sendo a água armazenada no reservatório enterrado conduzida até um outro reservatório de 1.000 litros localizado na UFS no Departamento de Engenharia Civil

(DEC) no Laboratório de Hidráulica (LABHID). Ademais, acoplado ao reservatório de 1.000 litros se faz presente um sistema de recirculação com bombeamento de acionamento manual (Figura 8), que é acionado com o intuito de homogeneizar a água bruta para garantir a preservação das suas características naturais durante as análises.

Ainda acoplado ao reservatório de 1.000 litros, faz-se presente um regulador de vazão, constituído por um balde cuja entrada de água é controlada por uma boia, o que permite eliminar a influência do nível d'água do reservatório sobre a vazão de entrada dos filtros, mantendo a carga de água constante.

Figura 8 - Sistema hidráulico interno ao LABHID.



Fonte: Autora (2025).

4.6 Meio filtrante e camada suporte

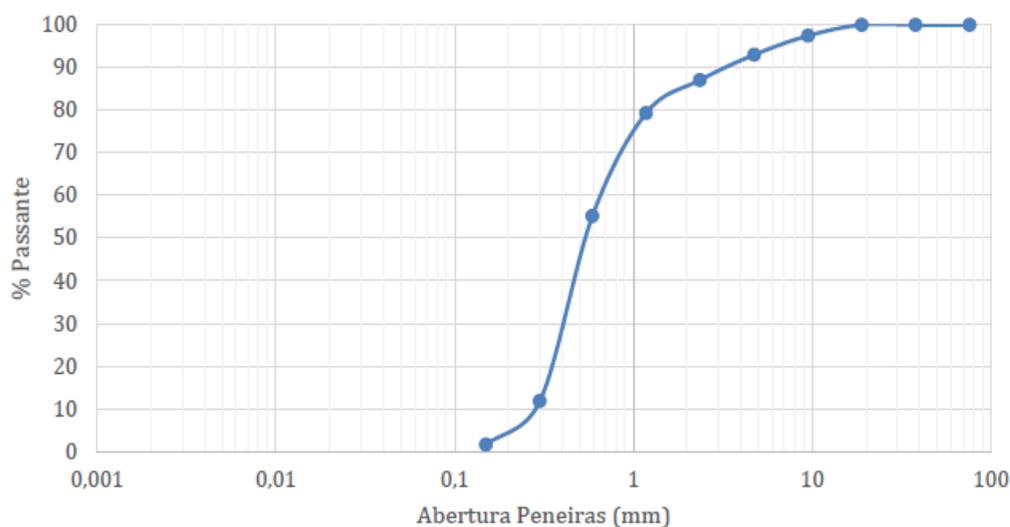
Foram utilizados materiais convencionais e não convencionais para o preenchimento dos meios filtrantes do sistema piloto, sendo a areia e o carvão comercial ativado de alta pureza os materiais convencionais, e o biocarvão proveniente do cacto o material não convencional.

(a) Areia

A areia utilizada como meio filtrante nos filtros foi a mesma (porém nova) utilizada e caracterizada por Rocha Júnior (2024), a qual foi adquirida em loja de materiais de construção. Desta forma, a areia utilizada, de acordo com o autor, quanto à granulometria do material

(Figura 9), possui mais de 97% dos diâmetros menores que 4,75 mm, coeficiente de uniformidade de 2,6 e tamanho efetivo dos grãos de aproximadamente 0,27 mm.

Figura 9 - Curva granulométrica da areia utilizada.



Fonte: Rocha Júnior (2024).

(b) Carvão ativado e biocarvão

O biocarvão (BC) utilizado foi produzido conforme descrito no item 4.4. Já o carvão comercial ativado (CA) utilizado foi o carvão ativado em pó de alta pureza de origem vegetal proveniente da casca do coco (especificação de 0,03% de ferro, cloreto máximo 0,1%, sulfato máximo 0,01%, zinco máximo 0,001% e metais pesados inferior a 0,005%), tendo em vista que a finalidade de utilização deste material era o de tratamento de água. Além disso, destaca-se que, ambos os materiais foram caracterizados no decorrer do estudo.

(c) Brita

O material da camada suporte adotado foi caracterizado por Rocha Júnior (2024), sendo este comprado em loja de materiais de construção. Assim, a camada foi constituída por três tipos de brita, sendo estas, brita 1, brita 2 e brita 3, que conforme o autor, possuem dimensões médias de 16,9, 23,4 e 26,9 cm, respectivamente. Portanto, as britas foram distribuídas gradualmente no sentido do fluxo, de forma que, a água passava primeiramente na camada de brita 1, logo em seguida na camada de brita 2 e por último na camada de brita 3, de modo a cumprir a função de retenção dos grãos do meio filtrante.

(d) Manta geotêxtil não tecida

Também foi utilizada manta geotêxtil não tecida do tipo bidim na camada filtrante, com densidade superficial de 200 g/m². Com a referida densidade, a manta permite a passagem da água e impede a perda do material confinado (carvão ativado e biocarvão). Assim, segundo Sousa Junior, Mendes e Inácio (2020), as mantas geotêxteis são formadas por estruturas de fibras dispostas aleatoriamente, em geral em formato de folhas, com sobreposições que configuram múltiplos poros interconectados. Deste modo, o material foi utilizado para envolver o carvão ativado e o biocarvão, e ainda, para segregar o meio filtrante da camada suporte.

4.7 Filtros: Sistema piloto

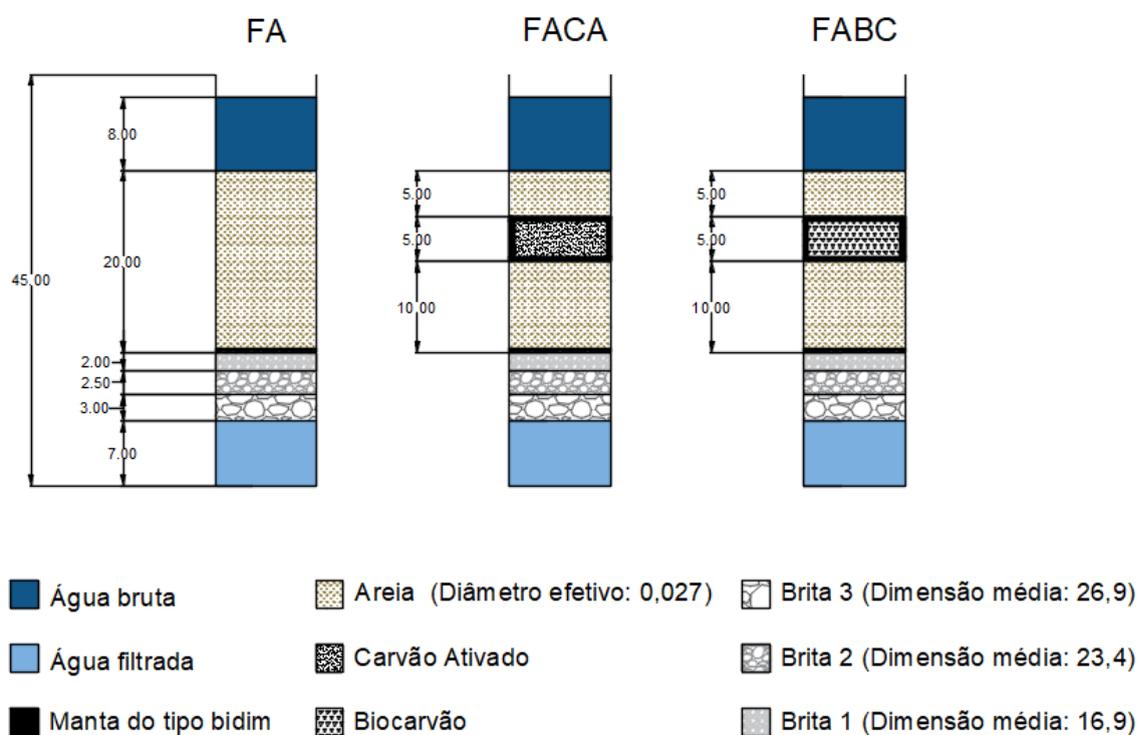
A infraestrutura dos filtros, concebida por Lima (2020a), como já mencionado, fica localizada no LABHID/UFS e é alimentada pelo reservatório de 1.000 L ilustrado na Figura 8b.

Os filtros foram confeccionados com dimensões de 11 x 11 cm (área transversal de 121 cm²) e 45 cm de altura total, sendo elaborados em vidro com 4 mm de espessura, e possuindo tubulações e conexões de Policloreto de Vinila (PVC).

O sistema funcionou com sentido de fluxo descendente, passando pelo meio filtrante, camada suporte e pelo fundo falso, respectivamente. A água filtrada para análise é coletada por meio de torneiras acopladas ao fundo falso dos filtros. Vale mencionar que após o amadurecimento da camada biológica (camada *schmutzdecke*) uma camada de água acima do meio filtrante de até 8 cm formou-se em todos os filtros.

Foram utilizados três filtros denominados: Filtro com Areia (FA), Filtro com Areia e Carvão Ativado (FACA) e Filtro com Areia e Biocarvão (FABC). As dimensões em perfil das camadas filtrantes e suporte estão ilustradas na Figura 10.

Figura 10 – Dimensões e especificações dos meios filtrantes e da camada suporte (em centímetros).



Fonte: Autora (2025).

Assim, o FA foi totalmente preenchido com areia, enquanto o FACA foi preenchido com camada de areia tipo sanduíche para confinar o carvão comercial ativado, contido com manta geotêxtil não tecida do tipo bidim, além disso, o FABC, também foi preenchido com camada de areia tipo sanduíche para confinar o biocarvão em manta do tipo bidim (Figura 11). Vale mencionar que também foram adicionadas mantas bidim entre a camada suporte e a areia. Ademais, nos filtros FACA e FABC foram usados, aproximadamente, 404 e 190 g, respectivamente, de carvão comercial ativado e de biocarvão, sendo obtida a espessura de aproximadamente 5 cm na camada filtrante.

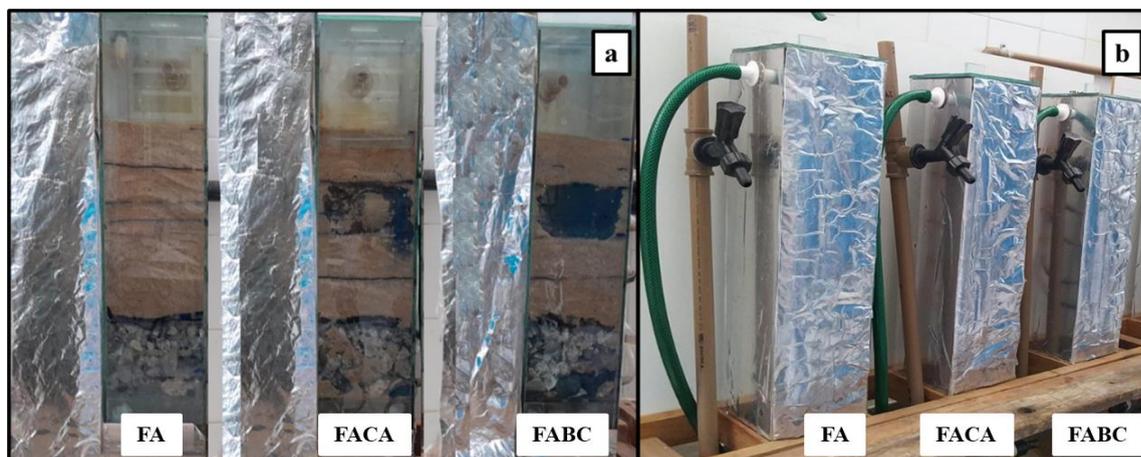
Figura 11 - Sachês com carvão comercial ativado e com biocarvão.



Fonte: Autora (2025).

Assim, após os filtros serem preenchidos (Figura 12a), estes foram envoltos com papel alumínio (Figura 12b), com o intuito de protegê-los das condições ambientais adversas que pudessem comprometer o funcionamento adequado dos filtros.

Figura 12 - Filtros preenchidos com os meios filtrantes (a) e filtros preenchidos envoltos de papel alumínio (b).



Fonte: Autora (2025).

Quanto à taxa de filtração, o sistema operou com taxa constante de aproximadamente $3 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, sendo ajustada manualmente com a abertura dos registros de saída do sistema. Desta maneira, para verificar a consistência da vazão de entrada, mediu-se os tempos necessários para encher um becker graduado de 500 mL, sendo registrado o tempo a cada 50 mL.

Após o estabelecimento da taxa de filtração, tornou-se possível a determinação da vazão de entrada necessária de cada filtro, tendo em vista o conhecimento da área transversal do filtro e a Equação 1:

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

em que t é a taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), Q é a vazão do filtro (m^3/dia) e A é a seção transversal dos filtros (m^2).

Ao que tange a limpeza dos filtros, o sistema possuía registro na tubulação de entrada dos filtros para a realização de procedimentos operacionais, deste modo, a alimentação com água do filtro era interrompida e a limpeza era realizada a partir da raspagem (Figura 13) de 4 centímetros da camada superficial de areia. Assim, o material raspado era lavado em água corrente e realocado nos filtros. Ademais foram realizadas 2 lavagens dos meios filtrantes, sendo nos dias de operação 118 e 222, nas quais o critério de interrupção das carreiras de filtração foi a redução da vazão de saída, tendo em vista que as vazões de entrada nos filtros

eram de aproximadamente 25 mL/min e a vazão média de saída ao final da primeira carreira para FA, FACA e FABC foram quantificadas em 3,62, 3,98 e 3,97 mL/min respectivamente, enquanto que na segunda carreira foi de 4,71, 4,46, 4,81 mL/min, sendo constatada a redução de vazão na finalização das carreiras de filtração.

Figura 13 - Raspagem do meio filtrante.



Fonte: Autora (2025).

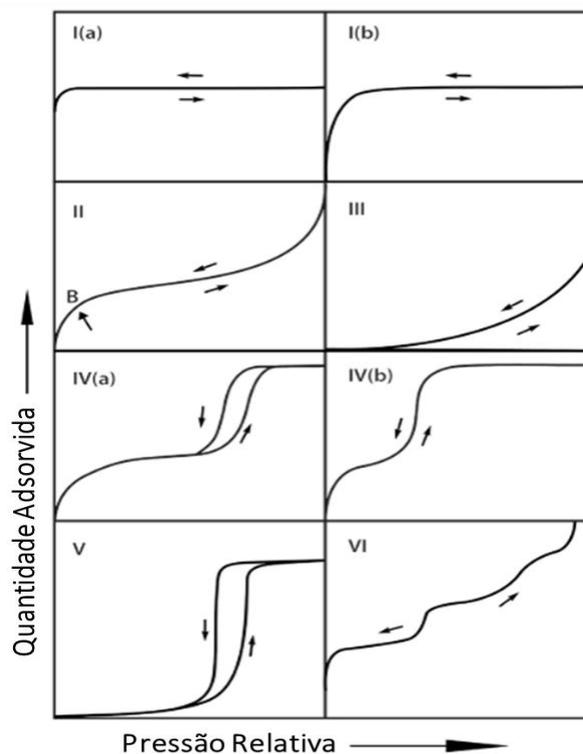
4.8 Caracterização do Biocarvão (BC) e do Carvão Ativado (CA)

Para a avaliação da morfologia e estrutura do BC e do CA, foram realizadas as análises BET e MEV com EDS no Condomínio de Laboratórios Multiusuário do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (CLMDCEM) da UFS, enquanto, a análise DRX foi realizada no Departamento de Física da UFS. Vale ressaltar que para a realização dos ensaios, as amostras foram secas em estufa durante 24 h a 60 °C para retirada da umidade, a fim de evitar possíveis interferências nos resultados das análises.

4.8.1 BET

O Analisador de Área de Superfície utilizado foi o Quantachrome NOVA 1200e. Desta forma, a área superficial dos materiais foi encontrada com a técnica de BET. Além de que, o tamanho e volume dos poros foi determinado usando o método de *Barret, Joyner e Halenda* (BJH). Assim, foi realizada a adsorção e dessorção do gás nitrogênio (N₂) a 77 K, após aquecimento de 100 °C durante 2 horas, sendo este tempo e temperatura adotado conforme Carvalho (2018). Além disso, foi classificada a estrutura dos poros dos materiais, conforme as isotermas (Figura 14), de acordo com Thommes *et al.* (2015).

Figura 14 - Isotermas de adsorção.



Fonte: Adaptado de Thommes *et al.* (2015).

4.8.2 MEV com EDS

O Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado foi o JEOL (JSM-5700) acoplado com Espectrofotômetro de Energia Dispersiva (EDS). Ademais, as amostras foram alocadas em superfície de alumínio, com fita adesiva de carbono, e posteriormente foram revestidas com camada de ouro na Metalizadora/Evaporadora DENTON VACUUM (Desk V). Desta forma, para a obtenção das imagens da microscopia dos materiais foi utilizada tensão de 5 kV com ampliações de 500x, 1.500x, 5.000x, 10.000x e 15.000x, enquanto, para a análise com EDS, foi utilizada a tensão de 15 kV.

4.8.3 DRX

O Difratorômetro de Raios X utilizado foi o Rigaku RINT2200. Assim, para a análise adotou-se a voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA e variação de ângulo de 20 a 80 graus, sendo estes valores adaptado de Carvalho (2018).

4.9 Análise da água bruta e tratada

Tanto a água bruta quanto as águas tratadas, oriundas do tratamento com o coagulante/floculante natural, filtração com areia, com biocarvão e com carvão comercial ativado de alta pureza, foram analisadas conforme os parâmetros de qualidade da água, com a frequência de análise de acordo com o Quadro 4 e Quadro 5, respectivamente para parâmetros monitorados para os ensaios de coagulação/floculação e monitoramento dos filtros.

Quadro 4 - Parâmetros monitorados para a coagulação/floculação.

Parâmetros	Frequência	Número de análises	Metodologia	Equipamento	Local da análise
Cor aparente (uH)	Semanal	7	2120 (SMEWW, 2017)	MultiparamétricoDR/890	SAMA/UFS
Cor verdadeira (uH)	Semanal	7	2120 (SMEWW, 2017)	MultiparamétricoDR/890	SAMA/UFS
Turbidez (uT)	Semanal	7	2130 (SMEWW, 2017)	MultiparamétricoDR/890	SAMA/UFS
pH	Semanal	7	4500-H (SMEWW, 2017)	pHmetro	SAMA/UFS
Temperatura (°C)	Semanal	7	Termômetro digital	Sensor de temperatura	SAMA/UFS
DQO (mg/L)	Semanal	7	5210 (SMEWW, 2017)	MultiparamétricoDR/890	SAMA/UFS
Ferro total (mg/L)	Semanal	7	3120 (SMEWW, 2017)	Espectrofotometria de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado	ITPS*

*Instituto Tecnológico e de Pesquisa de Sergipe

Fonte: Autora (2025).

Quadro 5 - Parâmetros monitorados para a filtração.

Parâmetros	Frequência	Número de análises	Metodologia	Equipamento	Local da análise
Cor aparente (uH)	2 dias/semana	85	2120 (SMEWW, 2017)	MultiparamétricoDR/890	SAMA/UFS
Cor verdadeira (uH)	2 dias/semana	76	2120 (SMEWW, 2017)	MultiparamétricoDR/890	SAMA/UFS
Turbidez (uT)	2 dias/semana	85	2130 (SMEWW, 2017)	MultiparamétricoDR/890	SAMA/UFS
pH	2 dias/semana	76	4500-H (SMEWW, 2017)	pHmetro	SAMA/UFS
Temperatura (°C)	2 dias/semana	76	Termômetro digital	Sensor de temperatura	SAMA/UFS
Condutividade elétrica (µS/cm)	2 dias/semana	76	2510 (SMEWW, 2017)	Condutímetro	SAMA/UFS
Dureza (mg/L)	semanal	37	(Silva; Souza, 2013)	Titulação ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA)	SAMA/UFS
Ferro total (mg/L)	mensal	11	3120 (SMEWW, 2017)	Espectrofotometria de Emissão Atômica por Plasma Indutivamente Acoplado	ITPS
Coliformes totais (NMP/ 100mL)	mensal	11	9221 (SMEWW, 2017)	Tubos múltiplos	ITPS
Coliformes termotolerantes (NMP/ 100mL)	mensal	11	9221 (SMEWW, 2017)	Tubos múltiplos	ITPS

Fonte: Autora (2025).

4.10 Legislação vigente e limites comparativos

As águas tratadas com os sistemas de coagulação/floculação natural, filtração somente com areia, filtração com biocarvão e areia, e filtração com carvão comercial ativado e areia, foram comparadas com os limites dos parâmetros estabelecidos quanto à potabilidade de água, instituídos pelo Gabinete do Ministro do Ministério da Saúde, através da Portaria de Potabilidade nº 888 de 2021 (Brasil, 2021) com o intuito de avaliar os tratamentos propostos.

Assim, os valores máximos permitidos, de acordo com Brasil (2021), estão citados no Quadro 6.

Quadro 6 - Valores máximos permitidos (VMP) dos parâmetros analisados de acordo com a portaria vigente.

Parâmetros	VMP
Cor aparente (uH)	15
pH	6,0 a 9,0
Turbidez padrão organoléptico (uT)	5
Turbidez filtração lenta (uT)	1,0 (95% das amostras) e 2,0 (nas demais análises)
Ferro total (mg/L)	0,3
Dureza total (mg/L)	300
Coliformes totais (Ausência em 100 mL)	0
<i>Escherichia coli</i> (Ausência em 100 mL)	0

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

Ademais, ressalta-se que, dentre os parâmetros avaliados no presente estudo, estão estabelecidos na Portaria nº 396 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA valores máximos apenas para os parâmetros ferro (máximo de 0,3 mg/L), coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* (ambos com ausência em 100 mL), sendo esta portaria referente às diretrizes ambientais quanto as águas subterrâneas (Brasil, 2008).

4.11 Análise estatística

A análise estatística ocorreu após a compilação dos dados dos ensaios de cada parâmetro avaliado da água bruta e tratada ao longo dos 10 meses de avaliação das metodologias propostas. Além disso, foi comparado o melhor resultado do ensaio com o uso da coagulação/floculação (resultados para a dosagem ótima) com os resultados do FABC.

Desta forma, quanto à etapa de filtração, seja com meio filtrante convencional ou alternativo, foi avaliado se as amostras seguiram distribuições paramétricas ou não paramétricas, a fim de determinar os testes a serem aplicados. Assim, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk (H_0 : os dados seguem distribuição normal, $p\text{-valor} > 0,05$) para verificação da normalidade ou não normalidade dos dados, e a partir disso, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (H_0 : não há diferenças significativas entre as médias dos grupos, com $p\text{-valor} > 0,05$) e o teste paramétrico ANOVA (H_0 : as médias dos grupos avaliados são estatisticamente iguais, com $p\text{-valor} > 0,05$) seguido do teste Tukey (H_0 : não há diferenças significativas entre as médias dos grupos, com $p\text{-valor} > 0,05$).

Quanto à etapa de comparação estatística entre os resultados da coagulação/floculação e da etapa de filtração com FABC, foi utilizado o teste de Wilcoxon (H_0 : não há diferenças

significativas entre as médias das duas variáveis dependentes, $p\text{-valor} > 0,05$), com o intuito de observar as diferenças estatística entre os tratamentos avaliados.

Ademais, foi realizada a estatística descritiva para os parâmetros de qualidade da água bruta e tratada, com medidas de tendência central (mediana e média aritmética) e de dispersão (desvio padrão), assim como os valores de máximo e mínimo. Além disso, foram traçados gráficos de barra, linha, dispersão e *boxplot* para avaliação dos parâmetros.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Umidade do cacto e rendimento do biocarvão

Ao que concerne a umidade do material cacto, após o processo de secagem e aferição do peso final, esta foi em torno de 93%, o que se manteve de acordo com os estudos apresentados no Quadro 1. Ademais, quanto ao rendimento do biocarvão após processo de pirólise, este ficou em torno de 35% (Tabela 1), valor significativo quando comparado com outras fontes de biomassa, como a madeira seca, que conforme Bridgwater (2012), com temperaturas em torno de 400°C e tempo de permanência entre dias ou horas, o rendimento de sólidos (carvão) é em torno de 35%.

Silva *et al.* (2022), por sua vez, utilizaram a casca de café como material para produção de biocarvão ativado, com temperatura de pirólise de 350 °C durante 1 hora, velocidade de aquecimento de 10°C.min⁻¹ e agente ativante cloreto de zinco, obtendo rendimento de 42,1%. Ainda, Carvalho (2018), com a utilização da laranja pêra como biomassa, com taxa de aquecimento na pirólise de 25 °C.min⁻¹ e 450°C, obteve rendimento em cerca de 32%.

Desta forma, observa-se que as condições de pirólise e a fonte de biomassa influenciam diretamente o rendimento do biocarvão, pois determinam a proporção de carvão, óleo e gás gerados no processo (Bridgwater, 2012).

5.2 Caracterização: BC e CA

a) BET e BJH

Utilizando os modelos BET e BJH para a avaliação dos dados obtidos nos ensaios de adsorção física dos materiais BC e CA do meio filtrante, tornou-se possível a determinação da área superficial dos materiais, assim como o volume e raio dos poros, como ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da análise BET.

Amostras	Área BET (m ² /g)	Área BJH (m ² /g)	Volume de poros (cm ³ /g)	Raio dos poros (Å)
BC	0,039	0,348	0,003	27,974
CA	46,183	22,114	0,041	15,41

Fonte: Autora (2025).

Observa-se que quanto aos resultados obtidos (Tabela 2), o CA apresentou maior área superficial nos modelos BET e BJH com relação ao BC (superior em 99,9% e 98,4%, respectivamente), assim como o volume dos poros (superior em 92,7%). Já quanto aos raios dos poros, o BC apresentou resultado superior que o CA (superior em 44,9%). Conforme Carvalho (2018), o carvão comercial ativado pode ter apresentado resultados superiores, quando comparado com ao BC, devido à forma de obtenção do CA, como a ativação do material.

Deste modo, Choudhary, Kumar e Neogi (2020), utilizando biocarvão oriundo do cacto (*Opuntia ficus-indica*) para fins de adsorção em água sintética de poluentes orgânicos e inorgânicos, determinaram através do uso da análise BET a área superficial do material de 1,15 m²/g e volume total de poros de 0,018 cm³/g, valores maiores que os obtidos no presente estudo (0,039 m²/g e 0,003 cm³/g), entretanto, frisa-se que a metodologia para preparo adotada pelos autores foram divergentes da presente pesquisa, como as condições de pirólise, que ocorreu com 400 °C por 1 hora em equipamento com fluxo contínuo de nitrogênio, fatores estes que podem ter ocasionado divergências entre os valores das pesquisas.

Quanto à área superficial e volume de poros do CA, foram obtidos valores de 46,183 m²/g e 0,041 cm³/g, respectivamente, sendo estes resultados relativamente menores que os valores obtidos por Carvalho (2018) ao caracterizar o carvão comercial ativado, que obteve para área superficial 64,023 m²/g e volume de poros 0,117 cm³/g.

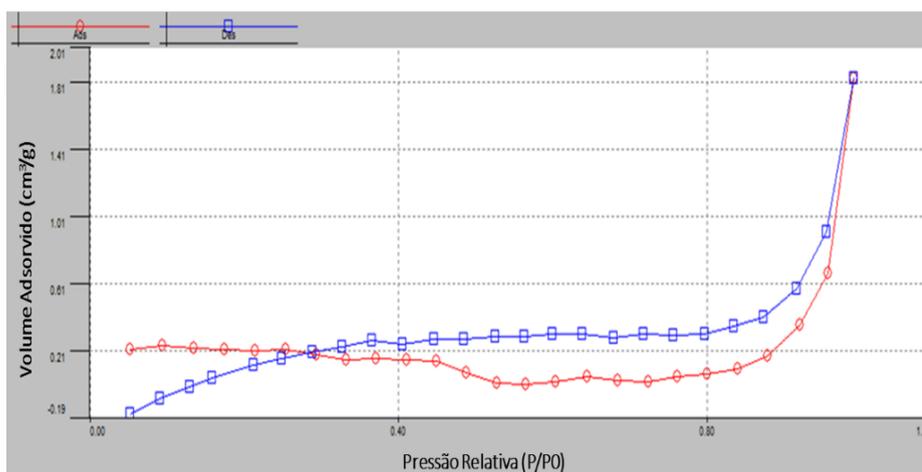
Vale mencionar que o modelo BET é mais empregado para quantificar a área superficial total, enquanto o BJH é o método mais utilizado para calcular a distribuição de tamanho dos poros (Oliveira, 2010), assim, observa-se que as diferenças metodológicas explicam as variações nos resultados observados.

Em suma, Werlang *et al.* (2013) afirmaram que CA se caracteriza por apresentar área superficial e estrutura dos poros mais significativo. O que foi confirmado com as informações apresentadas do BC em comparação ao CA.

Matematicamente, as isotermas descrevem, quantitativamente, em temperatura constante a adsorção de substância dissolvida (soluto) por sólidos (grãos do BC e CA). Assim, são apresentadas as isotermas obtidas no ensaio (Figura 15 e Figura 16) e as isotermas de adsorção conforme Thommes *et al.* (2015), ilustradas na Figura 14, o CA se assemelha ao Tipo I, sendo esta isoterma relacionada a sólidos microporosos possuindo superfícies externas relativamente pequenas, enquanto o BC se assemelha ao Tipo II, sendo esta isoterma relacionada a estruturas macroporosas ou não porosas.

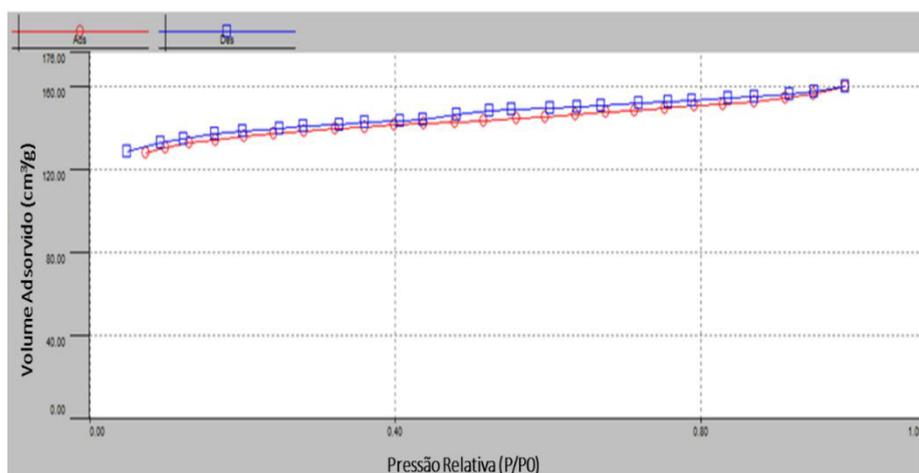
Deste modo, a estrutura apresentada no CA, para processos como filtração de água, por ser microporoso e por consequência apresentar maior área superficial, disponibiliza maior superfície para retenção de partículas. Partindo deste aspecto, como no presente estudo foram avaliadas as remoções de diversos parâmetros, esta estrutura contribui para melhor eficiência no sistema de filtração.

Figura 15 - Isoterma do BC (volume x pressão relativa).



Fonte: Autora (2025).

Figura 16 - Isoterma do CA (volume x pressão relativa).

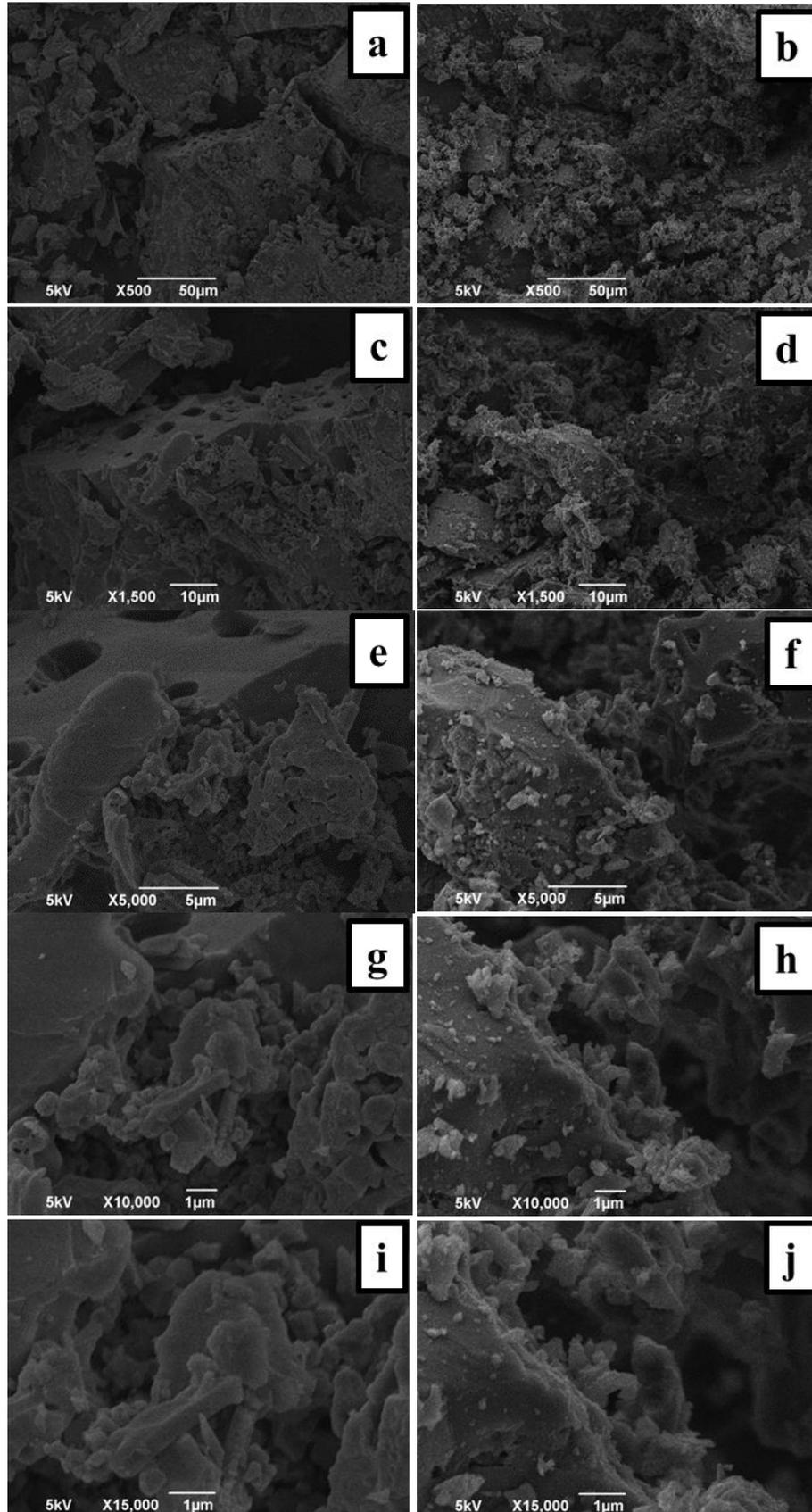


Fonte: Autora (2025).

b) MEV com EDS

A análise MEV tornou possível a visualização da microestrutura do CA e do BC em variadas ampliações, como ilustradas na Figura 17. As imagens foram obtidas utilizando tensão de 5 kV e distância focal de 10 mm.

Figura 17 - Imagens de MEV para BC com ampliações 500x (a), 1500x (c), 5000x (e), 10000x (g), 15000x (i) e imagens de MEV para CA com ampliações 500x (b), 1500x (d), 5000x (f), 10000x (h) e 15000x (j).



Fonte: Autora (2025).

Nota-se que o biocarvão (Figura 17a, Figura 17c, Figura 17e, Figura 17g e Figura 17i) possui superfície e poros heterogêneos, com algumas cavidades abertas, arredondadas e com profundidade. Choudhary, Kumar e Neogi (2020), na análise MEV, com o biocarvão de cacto, também observaram superfície áspera e parcialmente porosa, o que foi justificado tendo em vista a eliminação da matéria volátil da biomassa. Enquanto o carvão ativado possui superfície mais porosa e com distribuição mais regular (Figura 17b, Figura 17d, Figura 17f, Figura 17h e Figura 17j) quando comparado com o biocarvão, o que corrobora os resultados da análise BET.

Desta maneira, a estrutura apresentada no BC, para filtração de água, por ser mais heterogênea, torna-se mais eficaz para a remoção de partículas de tamanhos variados. Considerando este aspecto, como no presente estudo foram avaliados diversos parâmetros com partículas de tamanhos variados, a estrutura do BC também se revela como adequada quanto à eficiência de remoção na filtração.

Quanto aos resultados do EDS, utilizou-se a tensão de 15 kV, sendo identificados os materiais que compõem BC e CA, assim como as suas porcentagens (Tabela 3) de maneira semiquantitativa (devido as características de composição do próprio ensaio, como, por exemplo, o acréscimo na presença do elemento carbono dada a composição da fita em que o material fica acondicionado).

Tabela 3 - Resultado do EDS (porcentagem em peso) dos elementos químicos identificados.

Elementos	Porcentagem em peso (%)	
	BC	CA
C	47,86	88,89
O	27,13	7,72
Si	-	3,39
Mg	2,50	-
Cl	2,53	-
K	8,12	-
Ca	11,86	-
Total	100,00	100,00

- Não identificado

Fonte: Autora (2025).

Conforme Tabela 3, foi observado que tanto em BC como em CA o elemento carbono foi o de maior destaque, contudo, vale mencionar que o percentual desse elemento na amostra pode ser menor do que o indicado, tendo em vista que o carbono também está presente na fita de carbono utilizada para realização da análise.

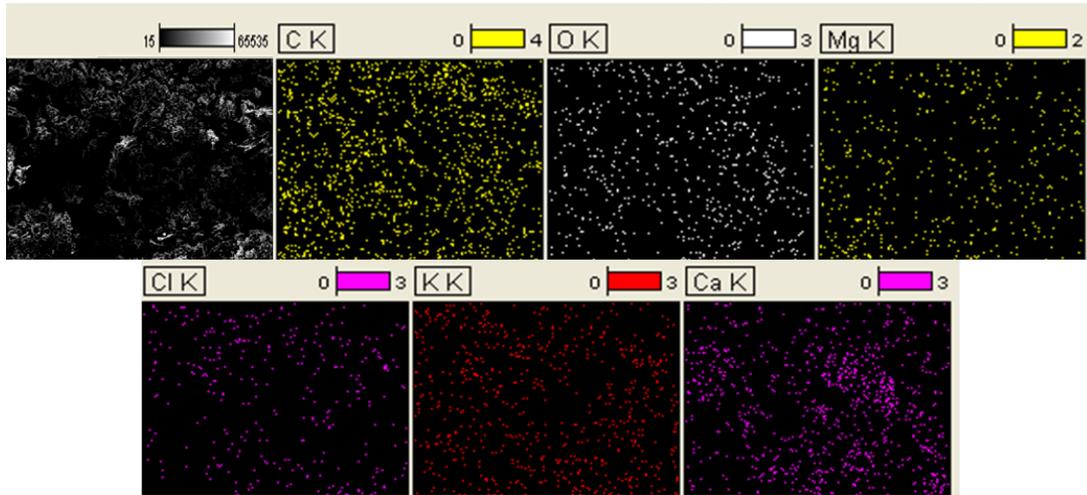
Além do elemento carbono (C), como ilustrado na Tabela 3, foram também identificados no BC os elementos oxigênio (O), magnésio (Mg), cloro (Cl), cálcio (Ca) e potássio (K), sendo a presença de Ca (11,86%), K (8,12%) e Mg (2,50%) já esperados, conforme ilustrados nas informações do Quadro 2. Vale frisar que diversos elementos químicos em proporções variadas podem ser identificados na palma forrageira, devido a sua variedade no plantio, como identificado no estudo de Ferraz *et al.* (2020), que ao avaliarem a composição mineral da palma forrageira (variedade baiana) com diferentes níveis de água no solo, identificaram na planta diversos teores de macronutrientes, N, P, K, Ca, Mg e S e de micronutrientes Cu, Fe, Mn, Zn, Cl, Na e B para diferentes tipos de manejo de água no solo.

Quanto ao CA, além do carbono com porcentagem 88,89% e oxigênio com 7,72%, também foi identificado o silício (Si) com 3,39%. Frisa-se que Bittencourt *et al.* (2018), ao caracterizarem diversos carvões, dentre estes o carvão ativado comercial, a fim de avaliar a adsorção de cromo hexavalente, identificaram os elementos C, O, Al, Si e P, sendo C, O e Si também identificados neste presente estudo.

A título de informação, as legislações vigentes não citam limites máximos para a presença de Si, Mg, Cl, K e Ca na água, contudo, observa-se que a presença destes elementos nos materiais utilizados não é expressiva (Tabela 3), tendo em vista que, se consumidos de maneira adequada, não ofertam malefícios a saúde humana, considerando que a Organização Mundial da Saúde - OMS (2005) cita que em torno de 21 minerais são conhecidos ou estão sendo avaliados como essenciais para boa saúde dos seres humanos, incluindo cálcio, magnésio, potássio, cloro e silício.

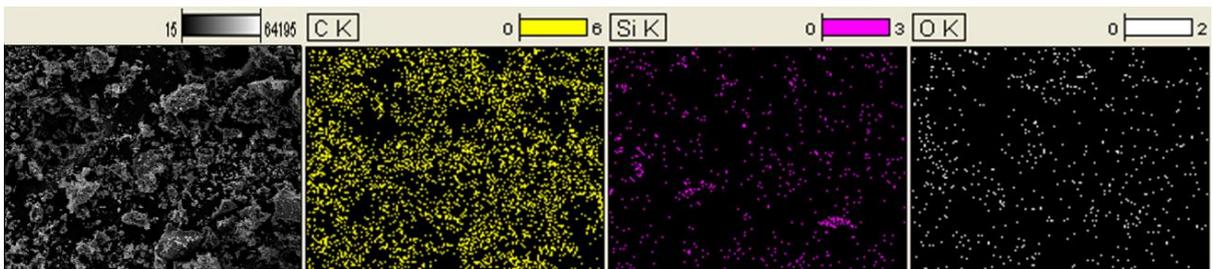
Além disso, com o EDS, foi possível a obtenção das imagens de distribuição dos elementos presentes na amostra, como ilustradas na Figura 18 (referente ao BC) e Figura 19 (presentes no CA), a fim de otimizar a visualização da composição dos materiais associada à sua estrutura. Deste modo, nota-se que os elementos C e O, tanto em BC quanto em CA, apresentam maiores concentrações na superfície, enquanto os demais se encontram distribuídos mais dispersamente, corroborando os resultados da Tabela 3.

Figura 18 - Distribuição dos elementos químicos na superfície do BC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 19 - Distribuição dos elementos químicos na superfície do CA.

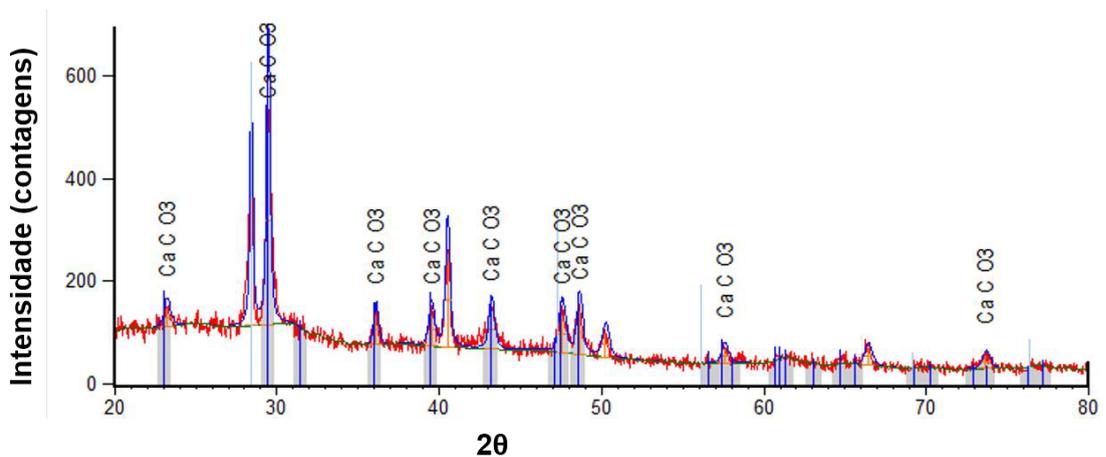


Fonte: Autora (2025).

c) DRX

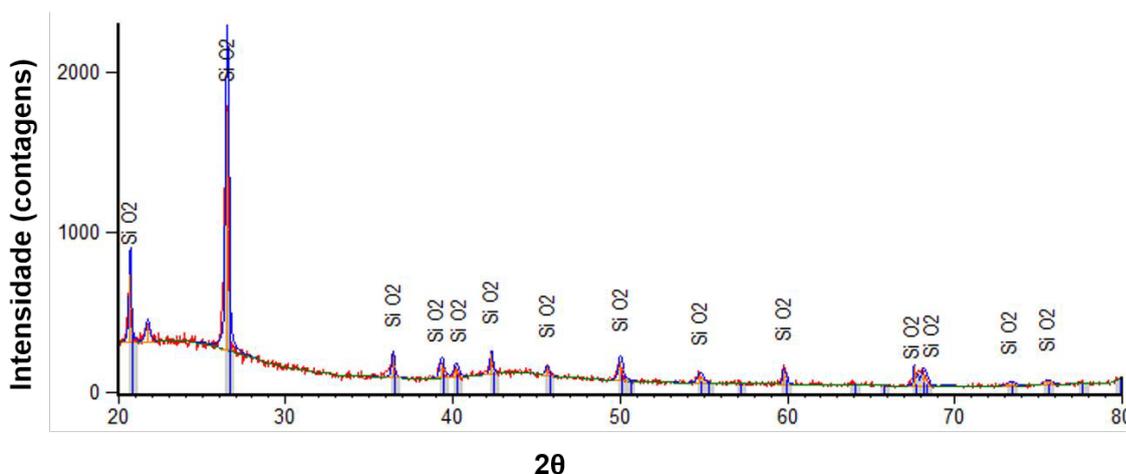
O uso de DRX possibilitou a visualização dos picos referentes às fases cristalinas de compostos inorgânicos nos materiais BC (Figura 20) e CA (Figura 21).

Figura 20 - Resultado da análise DRX para BC (intensidade x ângulo).



Fonte: Autora (2025).

Figura 21 - Resultados da análise DRX para CA (intensidade x ângulo).



Fonte: Autora (2025).

Desse modo, conforme Figura 20, para BC foi identificado picos referentes às fases cristalinas de composto inorgânico, com o maior pico centrado em 2θ igual a $29,41^\circ$, atribuídos à presença de CaCO_3 (carbonato de cálcio), estando em consonância com os elementos detectados com a análise MEV com EDS. Maaoui *et al.* (2023), ao avaliarem a pirólise lenta dos cladódios de *Opuntia Ficus Indica*, conforme os resultados da análise DRX, dentre os compostos químicos encontrados, também identificaram CaCO_3 .

Para CA, também foi identificado picos referentes às fases cristalinas de compostos inorgânicos, com o maior pico centrado em 2θ igual a $26,65^\circ$ (Figura 21), atribuídos à presença de SiO_2 (dióxido de silício), estando também em consonância com os elementos identificados na análise MEV com EDS. Silva *et al.* (2019), analisaram o uso do carvão ativado do coco da baía quanto aos parâmetros físico-químicos de efluentes oleosos, sendo identificado na análise DRX que parte expressiva da constituição do carvão ativado é de base amorfa, contudo, apresentando também algumas fases cristalinas, além disso, o estudo também observou a presença do composto SiO_2 .

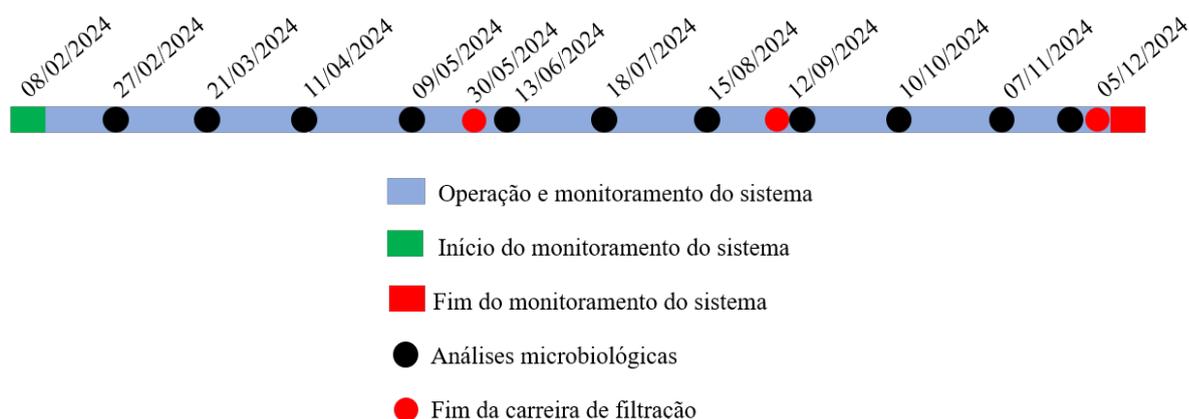
Assim, os materiais apresentaram comportamentos similares, no sentido de, embora apresentem fundos moderadamente elevados entre os picos, indicando fases amorfas, ambos exibiram picos característicos de fases cristalinas dada as suas composições, fator que pode ser auxiliar no desempenho do processo de filtração, tendo em vista a diversidade de contaminantes que podem estar presentes na água avaliada.

5.3 Análise dos parâmetros na filtração

Inicialmente, os filtros tiveram *start* de operação no dia 08 de fevereiro de 2024, com monitoramento das águas (bruta e tratada) para os parâmetros turbidez e cor aparente, que se estendeu até 26 de fevereiro de 2024, cujo objetivo foi acompanhar o amadurecimento dos filtros. A partir do início da melhoria nos parâmetros supracitados, todos os demais parâmetros para água bruta e tratada começaram a ser monitorados, com início em 26 de fevereiro de 2024 e término em 05 de dezembro de 2024.

Frisa-se que, a primeira carreira de filtração foi encerrada em 30 de maio de 2024 (33 campanhas), a segunda carreira em 12 de setembro de 2024 (28 campanhas) e a terceira em 05 de dezembro de 2024 (24 campanhas), sendo realizadas 85 campanhas ao total. A Figura 22 descreve, cronologicamente, a linha do tempo operacional do sistema avaliado.

Figura 22 - Linha do tempo de operação do sistema avaliado.



Fonte: Autora (2025).

5.3.1 Cor

Quanto aos valores obtidos para cor aparente das análises, para a água bruta, cerca de 74% dos dados ficaram acima do permitido em Brasil (2021), sendo 15 uH o valor máximo permitido, além disso, durante as análises os valores de cor aparente para a água bruta, oscilaram entre 0 e 96 uH, conforme Tabela 4, que ilustra a estatística descritiva da cor aparente e verdadeira (média, mediana, desvio padrão, valor máximo e mínimo), da água bruta e tratada. Quanto à cor verdadeira da água bruta (Tabela 4), após processo de filtração em membrana e bomba a vácuo, esta se manteve entre 0 e 17 uH nas análises realizadas.

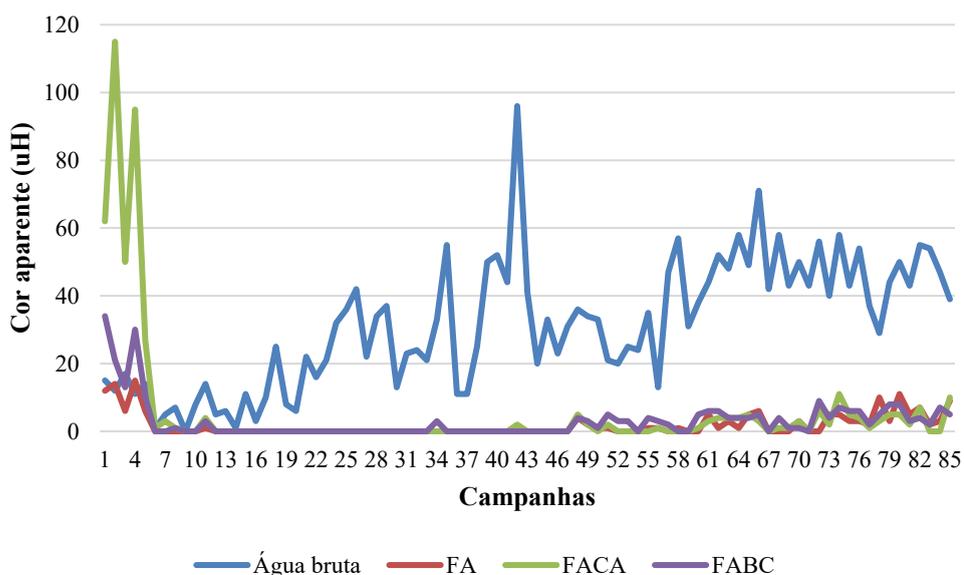
Tabela 4 - Estatística descritiva para o parâmetro cor aparente (uH).

	Água bruta		Água tratada		
	Cor aparente	Cor verdadeira	FA	FACA	FABC
Média	31,39	2,75	1,85	5,41	3,05
Mediana	32,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Desvio padrão	18,75	4,53	3,36	18,07	5,73
Máximo	96,00	17,00	15,00	115,00	34,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autora (2025).

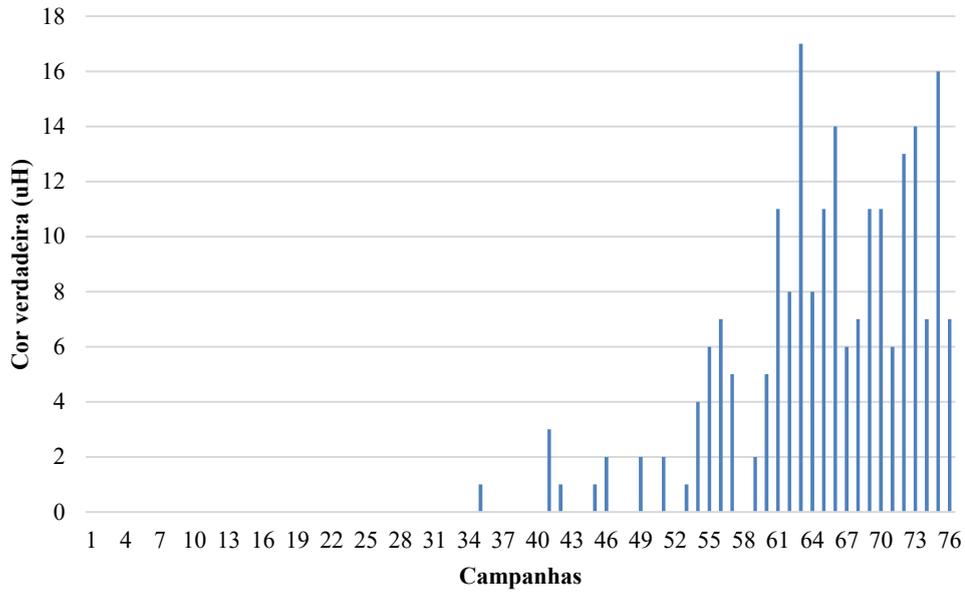
A Figura 23 ilustra os valores obtidos tanto para cor aparente da água bruta, quanto para a água tratada (FA, FACA e FABC), enquanto a Figura 24, ilustra os resultados obtidos para o parâmetro cor verdadeira da água bruta. Salienta-se que, como já mencionado, nas análises após a limpeza do meio filtrante, os filtros estavam em processo de amadurecimento da camada biológica, sendo obtidos valores mais expressivos no parâmetro cor aparente, como entre as campanhas 1 a 5 (primeira carreira de filtração), na campanha 34 (segunda carreira de filtração) e entre as campanhas 62 e 66 (terceira carreira de filtração). Além disso foram observados valores para parâmetro cor verdadeira diferentes de 0 uH a partir da campanha 35 (segunda carreira de filtração em diante).

Figura 23 - Resultados das análises para o parâmetro cor aparente.



Fonte: Autora (2025).

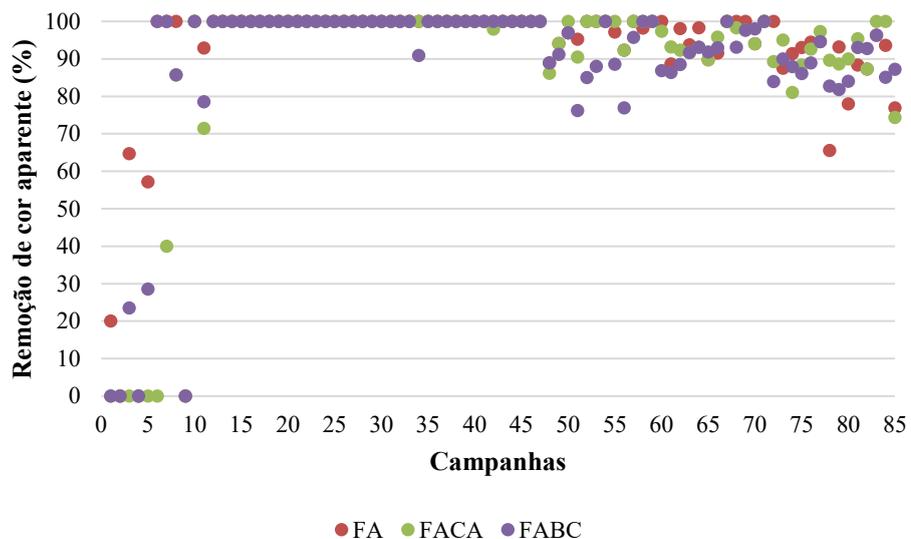
Figura 24 - Resultados das análises para o parâmetro cor verdadeira.



Fonte: Autora (2025).

Quanto às eficiências de remoção dos sistemas (Figura 25) optou-se por não plotar os resultados que expressavam eficiências com valores negativos (para todos os parâmetros de qualidade avaliados no presente estudo), pois podem levar a interpretações incorretas a respeito das eficiências dos sistemas de tratamento. Além disso, observa-se que a partir da campanha 6 todos os sistemas propostos proporcionaram melhorias na qualidade da água.

Figura 25 - Resultados de remoção para o parâmetro cor aparente.



Fonte: Autora (2025).

Após o processo de filtração, de acordo com a Tabela 4 e Figura 23, no FA os valores de cor aparente ficaram entre 0 e 15 uH, obtendo eficiências de remoção média de 91,7%, apresentando 100% dos valores abaixo do valor máximo estabelecido na legislação vigente. Já no FACA, os valores de cor aparente oscilaram entre 0 e 115 uH, obtendo eficiências de remoção média de 87,9%, além de que, 94,1% dos resultados após o tratamento ficaram abaixo do estabelecido na legislação. Por fim, no FABC foram obtidos valores de cor aparente entre 0 e 34 uH, sendo obtido eficiências de remoção média de 88,8%, com 96,5% dos parâmetros avaliados ficando abaixo do estabelecido na legislação.

Santos, Lima e Michelan (2023), avaliaram o desempenho de três filtros lentos com meio filtrante de areias e materiais sustentáveis para o tratamento de água subterrânea, em que a água e a infraestrutura do filtro foram as mesmas do presente estudo. No filtro com areia, foi utilizada camada suporte constituída de britas (7 cm de altura) e meio filtrante composto somente de areia (20 cm de altura), com coeficiente de uniformidade médio de 2,85, com taxas de filtração de 3 m³/m².dia, de modo que o sistema apresentou remoção de cor aparente de 38,61%. Ressalta-se que a cor aparente para a água bruta avaliada pelos autores, oscilou entre 22 e 66 uH.

Lima (2020a) analisou a eficiência de tratamento da água subterrânea mencionada, com filtração lenta, utilizando filtros constituídos por leitos filtrantes alternativos e convencional, com taxas de filtração de 3 m³/m².dia. Desta forma, o filtro convencional adotado foi o filtro de areia com camada suporte com britas (7 cm de altura) e meio filtrante de areia (20 cm de altura). Assim, com o sistema mencionado, o autor obteve cor aparente da água bruta com média de 38 uH (valores entre 3 e 27 uH) e média de remoção de 69,81%.

Oliveira Neto, Souza e Sens (2020), para tratar água de lago, utilizaram um filtro lento retrolavável com material filtrante, composto por única camada de areia, e um filtro lento retrolavável com dupla camada filtrante, composto de areia e carvão ativado granular. O filtro com areia possuía camada de areia (coeficiente de uniformidade de 1,56) com 40 cm de altura e camada suporte com 15 cm. Já o filtro composto por areia e carvão granular ativado possuía camada de areia com 10 cm de altura, de pedregulho com 10 cm, carvão ativado granular com 20 cm e camada suporte de seixo rolado com 15 cm. Além disso, os filtros operavam com taxa de filtração de 4 m³/m².d. Desta forma, os autores observaram remoção de 89% de cor aparente em ambos os filtros, com cor aparente da água bruta entre 13 e 141 uH.

Ademais, quanto ao uso de biocarvão no processo de filtração de água para fins de água potável, este já vem despontando, como observado no estudo de Eniola e Sizirici (2023), os quais investigaram o desempenho de biofiltro de areia modificado com biocarvão de tamareira

como meio filtrante, para o tratamento de águas subterrâneas, em escala laboratorial e piloto, operando em uma faixa intermediária de taxas de filtração (aproximadamente 75,8 e 24,7 m³/m².d, respectivamente), carregados de forma intermitente duas vezes por dia com um período de pausa de 12 horas, obtendo remoção de cor em cerca de 100%.

Ainda, conforme os valores obtidos no presente estudo, verificou-se que a atuação dos filtros quanto ao parâmetro cor aparente (Tabela 5), apresentou comportamentos semelhantes, fato esse corroborado devido análise estatística. Assim, conforme o teste de Shapiro-Wilk, obteve-se p-valor < 0,05 para todos os grupos de dados avaliados (água bruta, FA, FACA e FABC), o que indicou que os dados não seguiram distribuição normal. Portanto, a partir do teste de Kruskal-Wallis, quando avaliadas as médias dos parâmetros (p-valor obtido no teste < 0,05), foi observado que os valores para água bruta foram diferentes estatisticamente da água tratada, reiterando os resultados expressivos de remoções observados, enquanto os sistemas de filtração, por sua vez, quando comparados entre si, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Tabela 5 - Análise estatística entre os resultados para cor aparente.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
Água bruta - FA	161,49	39,78	Sim
Água bruta - FABC	144,52	39,78	Sim
Água bruta - FACA	153,12	39,78	Sim
FA - FABC	16,96	39,78	Não
FA - FACA	8,37	39,78	Não
FABC - FACA	8,59	39,78	Não

Fonte: Autora (2025).

Assim, dadas as eficiências de remoção e as diferenças estatísticas entre a água bruta e a água filtrada, observa-se que os filtros analisados ocasionaram mudanças na cor da água bruta. Portanto, nota-se que os filtros lentos, sejam com meios filtrantes convencionais ou não convencionais, possuem eficiência significativas quanto à remoção do parâmetro cor, levando em consideração os valores citados.

5.3.2 Turbidez

Cerca de 93% dos valores de turbidez para a água bruta ficaram abaixo de 5 uT, sendo este o valor máximo permitido em Brasil (2021). Apesar de nas análises iniciais e após a limpeza do meio filtrante, os filtros estarem em processo de amadurecimento do leito filtrante,

nos filtros FA, FACA e FABC os valores de turbidez ficaram abaixo do valor máximo permitido (1 uT) em 100,0%, 94,1% e 97,6%, e abaixo de 2 uT em 100%, 95,3% e 98,8% das análises, respectivamente. Desse modo, a Tabela 6 exibe os resultados da estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, valor máximo e valor mínimo) para o parâmetro turbidez da água bruta e das águas tratadas.

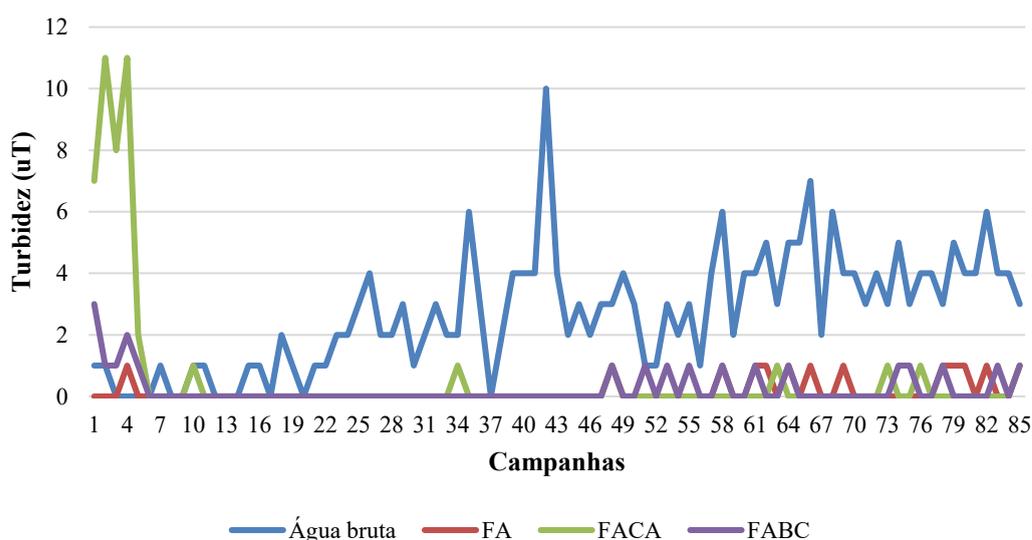
Tabela 6 - Estatística descritiva para o parâmetro turbidez (uT).

	Água bruta	Água Tratada		
		FA	FACA	FABC
Média	2,68	0,15	0,54	0,24
Mediana	3,00	0,00	0,00	0,00
Desvio padrão	1,92	0,36	2,02	0,53
Máximo	10,00	1,00	11,00	3,00
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autora (2025).

A Figura 26 ilustra os valores obtidos para turbidez da água bruta e água tratada (FA, FACA e FABC). Assim como o parâmetro cor aparente, para o parâmetro turbidez também foram obtidos valores mais expressivos no início da carreira de filtração (entre as campanhas 1 e 5 da primeira carreira de filtração), devido ao amadurecimento da camada biológica.

Figura 26 - Resultado das análises para o parâmetro turbidez

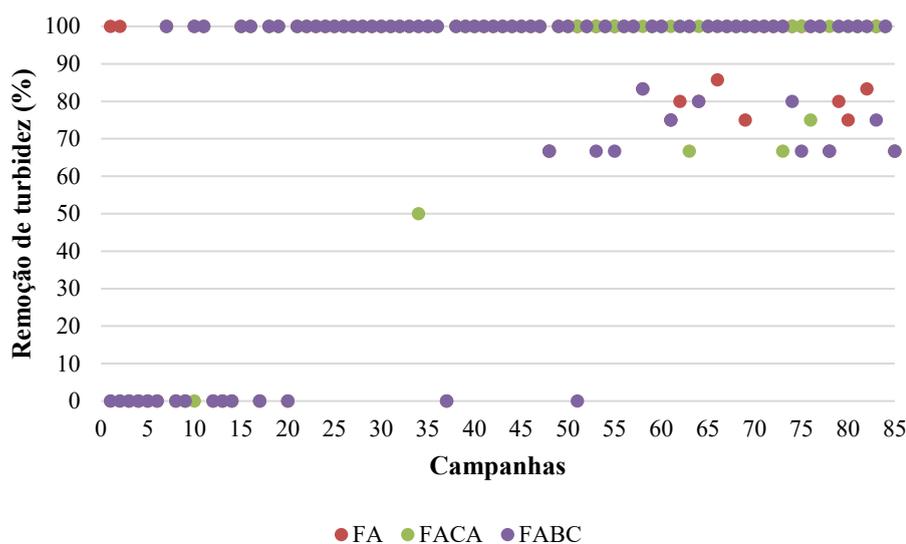


Fonte: Autora (2025).

Quanto às eficiências de remoção dos sistemas, conforme Figura 27 e Tabela 6, no FA, FACA e FABC foram obtidas médias de eficiências de remoção de 82,6%, 79,9% e 78,7%,

respectivamente. Além disso, no FA os valores de turbidez oscilaram entre 0 e 1 uT, enquanto no FACA obteve-se valores de turbidez entre 0 e 11 uT. Já FABC, a turbidez permaneceu entre 0 e 3 uT. Ainda, assim como o parâmetro cor aparente, a partir da campanha 6 todos os sistemas propostos proporcionaram melhorias na qualidade da água quanto ao parâmetro turbidez.

Figura 27 - Resultados de remoção para o parâmetro turbidez.



Fonte: Autora (2025).

De modo semelhante, Lima (2020a) obteve eficiência de remoção com o uso do filtro com areia em média de 85,32% (turbidez da água bruta entre 0,0 e 2,9 uT). Oliveira Neto, Souza e Sens (2020), obtiveram remoção de turbidez de 93% com o uso de filtro lento com areia (turbidez da água bruta entre 0,14 e 0,84 uT) e de 89% com o uso de filtro lento composto por carvão ativado granular e areia (turbidez da água bruta entre 0,17 e 0,82 uT). Santos, Lima e Michelin (2023), obtiveram valores de remoção de 48,60% após o processo de filtração com filtro lento com meio filtrante de areia (turbidez da água bruta entre 0,0 e 6,0 uT). Além disso, Eniola e Sizirici (2023), obtiveram remoção de 100% (turbidez da água bruta de 6,15 uT) com o uso de biocarvão com tamareira e areias como fonte de biomassa.

Ademais, quando avaliados os resultados de água bruta e água tratada do presente estudo, conforme o teste de Shapiro-Wilk, os conjuntos de dados não possuíram tendência para distribuição normal, apresentando p-valor < 0,05. Dessa maneira, quando analisadas as médias do parâmetro com teste de Kruskal-Wallis (p-valor obtido no teste < 0,05), observou-se que quando comparados os fatores água bruta e tratada (Tabela 7), foram apresentadas diferenças estatisticamente significativas, enquanto, quando comparados os sistemas de tratamento, estes não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Tabela 7 - Análise estatística entre os resultados para turbidez.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
Água bruta - FA	135,88	39,78	Sim
Água bruta - FABC	128,47	39,78	Sim
Água bruta - FACA	132,97	39,78	Sim
FA - FABC	7,41	39,78	Não
FA - FACA	2,91	39,78	Não
FABC - FACA	4,50	39,78	Não

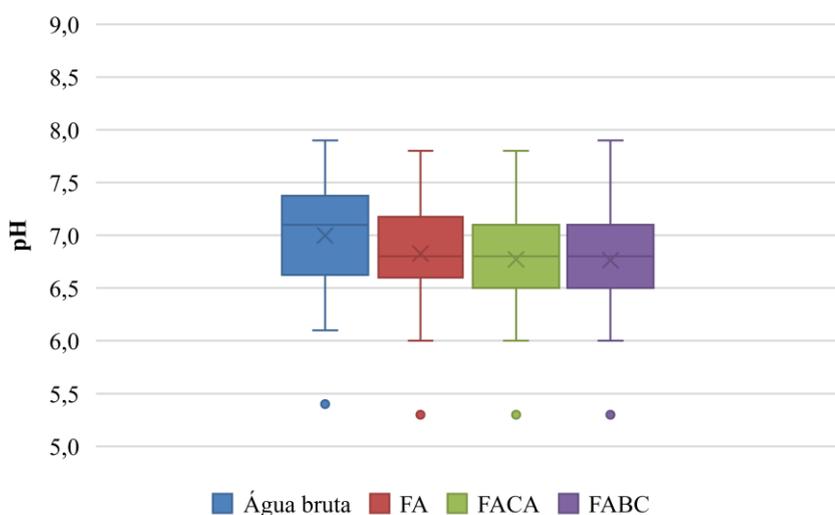
Fonte: Autora (2025).

Destarte, assim como observado para o parâmetro cor aparente, verificou-se que os filtros avaliados provocaram alterações na turbidez da água bruta devido às eficiências de remoção e as diferenças estatísticas (entre água bruta e água filtrada). Dessa forma, nota-se que os filtros lentos, sejam convencionais ou não convencionais, também proporcionam a remoção do parâmetro turbidez.

5.3.3 pH e temperatura

O potencial hidrogeniônico (pH) da água bruta e das águas tratadas com FA, FCA e FBC, enquadrou-se no limite estabelecido em Brasil (2021), permanecendo entre 6 e 9, conforme Figura 28, com exceção apenas dos resultados obtidos na campanha 58 (*outliers*), que ficaram abaixo do estabelecido em normativa.

Figura 28 - Resultados das análises para o parâmetro pH.



Fonte: Autora (2025).

Sendo assim, a Tabela 8 ilustra a estatística descritiva do parâmetro pH. Desse modo, os valores não apresentaram oscilações significativas, com intervalos interquartílicos pouco expressivos para água bruta, FA, FACA e FABC, de 0,8, 0,6, 0,6 e 0,6, respectivamente.

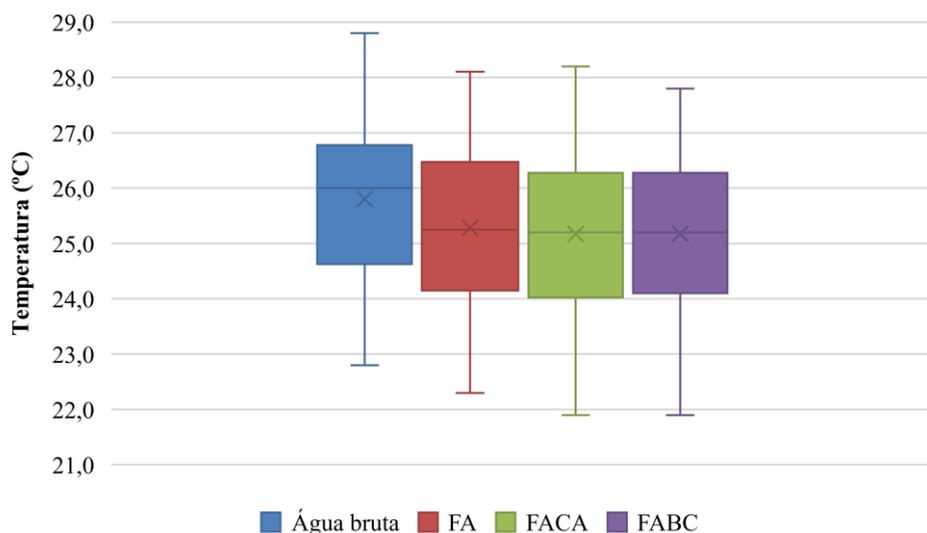
Tabela 8 - Estatística descritiva para o parâmetro pH.

	Água bruta	Água tratada		
		FA	FACA	FABC
Máximo	7,9	7,8	7,8	7,9
Mínimo	5,4	5,3	5,3	5,3
Mediana	7,1	6,8	6,8	6,8
Desvio padrão	0,49	0,46	0,43	0,43

Fonte: Autora (2025).

Assim como o pH, a temperatura durante as análises (Figura 29) manteve-se estável entre a água bruta e a água tratada nos sistemas de tratamento propostos, com a água bruta tendo média de 25,80 °C, FA com média de 25,28°C, FACA de 25,17°C e em FABC de 25,18°C (Tabela 9). O intervalo interquartílico para água bruta, FA, FACA e FABC foi de 2,2, 2,3, 2,3 e 2,2 °C, respectivamente, o que também ilustra a baixa dispersão dos resultados avaliados.

Figura 29 - Resultados das análises para o parâmetro temperatura.



Fonte: Autora (2025).

Tabela 9 - Estatística descritiva para o parâmetro temperatura (°C).

	Água bruta	Filtros		
		FA	FACA	FABC
Média	25,80	25,28	25,17	25,18
Mediana	26,00	25,25	25,20	25,20
Desvio padrão	1,52	1,47	1,46	1,44
Máximo	28,80	28,10	28,20	27,80
Mínimo	22,80	22,30	21,90	21,90

Fonte: Autora (2025).

Lima (2020a) observou resultados semelhantes em suas análises, quanto à temperatura, sendo a da água bruta em média de 26,6°C e da água tratada através de filtro com areia em média de 26,0 °C. Ainda, de acordo com o estudo, foi obtido pH da água bruta com oscilação entre 5,54 e 7,50 e da água tratada com filtro com areia entre 6,03 e 7,40.

Oliveira Neto, Souza e Sens (2020), obtiveram para a água bruta pH entre 6,77 e 7,41, com temperatura média de 24,1 °C, enquanto, com o tratamento utilizando filtro com areia, obtiveram pH entre 6,67 e 7,39. Para o filtro com areia e carvão granular ativado, os autores obtiveram pH entre 6,78 e 7,32, ambos com temperatura média de 24,3 °C. Dessa forma, verifica-se que, de maneira geral, os filtros não apresentaram notáveis oscilações de pH e temperatura com relação à água bruta.

Ademais, ao se analisar os dados de água bruta e água tratada do presente estudo (temperatura e pH), de acordo com o teste de Shapiro-Wilk, os conjuntos de dados possuíram tendência para distribuição normal, apresentando p-valor > 0,05. Desse modo, quando analisadas as médias dos parâmetros com teste ANOVA (p-valor obtido no teste < 0,05 para ambos os parâmetros), observou-se que quando comparados os fatores água bruta e tratada com os sistemas de filtração, diferenças estatisticamente significativas foram identificadas, enquanto o teste de Tukey (Tabela 10) indicou os grupos avaliados que possuíam diferenças.

Tabela 10 - Análise estatística entre os resultados para pH e temperatura.

pH					
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor	Diferença
FA - Água bruta	-0,17	-0,36	0,02	0,10	Não
FABC - Água bruta	-0,23	-0,42	-0,04	0,01	Sim
FACA - Água bruta	-0,23	-0,42	-0,04	0,01	Sim
FABC - FA	-0,06	-0,25	0,13	0,82	Não
FACA - FA	-0,06	-0,25	0,13	0,87	Não
FACA - FABC	0,01	-0,18	0,20	1,00	Não
Temperatura					
Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor	Diferença
FA - Água bruta	-0,52	-1,13	0,10	0,14	Não
FABC - Água bruta	-0,63	-1,24	-0,01	0,05	Sim
FACA - Água bruta	-0,63	-1,25	-0,01	0,04	Sim
FABC - FA	-0,11	-0,73	0,51	0,97	Não
FACA - FA	-0,11	-0,73	0,50	0,96	Não
FACA - FABC	-0,01	-0,62	0,61	1,00	Não

Fonte: Autora (2025).

Destaca-se que a água bruta apresentou pH e temperatura ligeiramente superior a água tratada, desse modo, quando comparados os sistemas de tratamento entre si e com a água bruta, constatou-se que, para os parâmetros pH e temperatura, houve diferenças estatísticas entre a água bruta e os filtros FABC e FACA. Contudo, essas diferenças são pouco significativas no processo em si, uma vez que as diferenças observadas não foram de magnitude suficiente para afetar o tratamento.

Lima (2020a), com o uso dos filtros lentos utilizados neste estudo, também observou diferenças estatísticas quanto ao pH e à temperatura entre a água bruta e tratada. O autor menciona que as oscilações de pH podem ter ocorrido devido às reações químicas provocadas pela atividade microbiana presente no sistema e/ou pela interação da água com os grãos que constituíam o meio filtrante. Já quanto às oscilações de temperatura, o autor cita que, dada as leis da termodinâmica, a água bruta tende a manter a temperatura por mais tempo, ofertando maior resistência ao equilíbrio térmico entre a água bruta e a temperatura do laboratório, sendo esse comportamento influenciado tanto devido a maior massa de água reservada quanto pelo material do reservatório.

5.3.4 Condutividade elétrica

Löble, Borba e Silva (2015) citam que a condutividade elétrica pode indicar a carga de diversos elementos (íons) presentes na água, sendo que a variação no parâmetro pode ser devida a diversos fatores, podendo, inclusive, ser um indicador de perda de sais do solo ou salinização, tendo em vista o processo de intemperismo, translocação e lixiviação.

Além disso, Athayde Júnior *et al.* (2009) mencionam que existe uma relação proporcional entre a concentração de sais dissolvidos e a condutividade elétrica, sendo que, no que diz respeito aos sólidos totais dissolvidos, todas as impurezas presentes nas águas, exceto os gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos presentes na água. Desse modo, a condutividade elétrica por si só não representa risco à saúde, todavia, os parâmetros sólidos totais dissolvidos, quando em grandes quantidades, pode ofertar malefícios, como proporcionar a água sabor desagradável, ocasionar acúmulo de sais na corrente sanguínea (formação de cálculos renais) e corroer tubulações (Santos; Mohr, 2013). Além disso, a CETESB (2013) menciona que valores acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ podem indicar a presença de poluentes no meio, como efluentes industriais ou domésticos.

Assim, quanto ao parâmetro condutividade elétrica, foram obtidos valores entre 168 e 518 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para água bruta (Tabela 11). Logo, a água bruta trouxe indicativo de poluição, conforme CETESB (2013). Todavia, ainda que os valores após tratamento tenham permanecido acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ocorreu a diminuição deste parâmetro após o processo de filtração (Figura 31) por meio de todos os filtros avaliados.

Tabela 11 - Estatística descritiva para o parâmetro condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

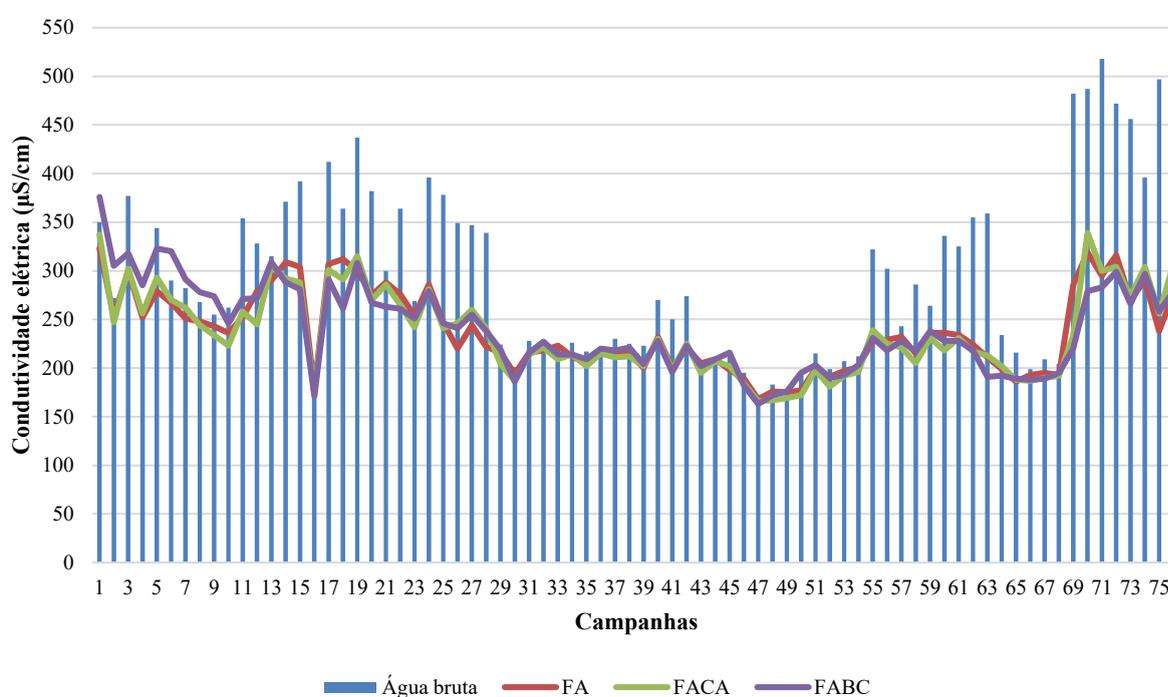
	Água bruta	Filtros		
		FA	FACA	FABC
Média	294,33	237,71	235,76	239,46
Mediana	271,00	230,50	227,50	228,00
Desvio padrão	88,42	41,43	43,67	44,36
Máximo	518,00	323,00	339,00	376,00
Mínimo	168,00	168,00	166,00	163,00

Fonte: Autora (2025).

Ademais, vale mencionar que o FABC trouxe incremento de condutividade apenas no início da primeira carreira de filtração (Figura 30), apresentando aumento no parâmetro em cerca de 10,5% das análises realizadas, sendo estas no início da operação do sistema (primeira carreira de filtração). Este fato pode ser justificado devido a presença de cálcio (Ca), magnésio

(Mg) e cloro (Cl) presentes no biocarvão utilizado, conforme explicitado no ensaio MEV com EDS (item 5.2) e carbonato de cálcio conforme análise DRX (item 5.2), tendo em vista que Arraes *et al.* (2009), ao identificarem os íons determinantes da condutividade elétrica nas águas superficiais da bacia do Curu no Ceará, concluíram que os principais íons responsáveis pela composição iônica da condutividade elétrica, para as águas da parte alta da bacia, foram Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- . Entretanto, conforme a Figura 30, verifica-se que a partir da décima análise o parâmetro condutividade elétrica no FABC passou a diminuir gradativamente, chegando a valores similares ou menores que os obtidos nos filtros FA e FACA.

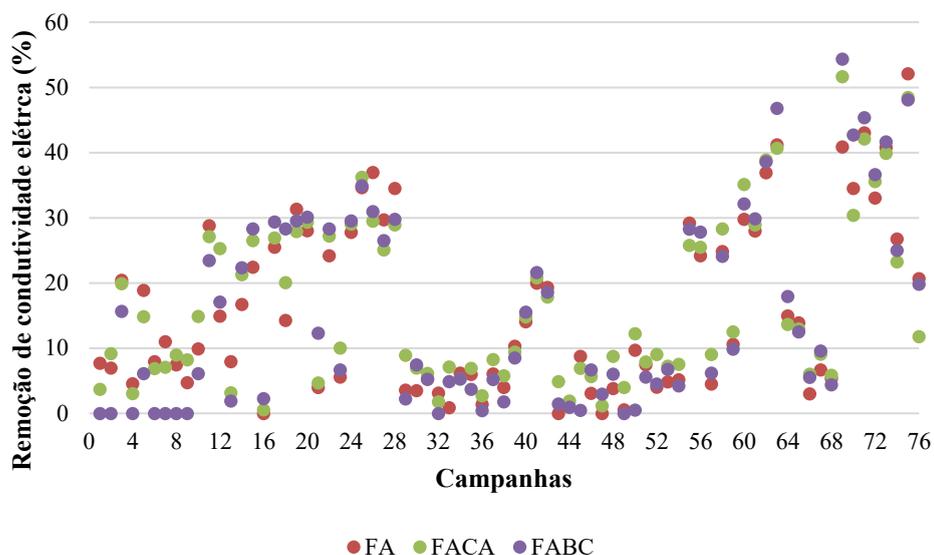
Figura 30 - Resultado das análises para o parâmetro condutividade elétrica.



Fonte: Autora (2025).

Desse modo, ao que tange as eficiências de remoção do parâmetro, ainda que estas tenham sido similares entre os filtros, conforme a Figura 31, o FABC apresentou menor média de eficiência de remoção, sendo esta de 15,6%. Já FACA apresentou eficiência de remoção média de 16,7% e FA de 15,8%.

Figura 31 - Resultado de remoção para o parâmetro condutividade elétrica.



Fonte: Autora (2025).

Ainda, o teste de Shapiro-Wilk indicou que todos os grupos avaliados (p-valor obtido > 0,05) possuíram tendência para distribuição normal. Conforme teste de Kruskal-Wallis (Tabela 12), dado p-valor < 0,05, de acordo com as médias dos dados, quando comparadas água bruta com água tratada estas foram estatisticamente diferentes, o que está em consonância com os valores de remoção obtidos nos tratamentos apresentados na Figura 31, o que indica que o uso dos sistemas exerceu influência quanto ao parâmetro. Além disso, quando avaliados os sistemas de filtração entre si, observa-se que estes não foram estatisticamente diferentes, ainda que FABC no início da primeira carreira de filtração tenha apresentado valores mais expressivos e remoções menos significativas.

Tabela 12 - Análise estatística entre os resultados para condutividade elétrica.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
Água bruta - FA	55,02	37,62	Sim
Água bruta - FABC	53,49	37,62	Sim
Água bruta - FACA	60,07	37,62	Sim
FA - FABC	1,53	37,62	Não
FA - FACA	5,05	37,62	Não
FABC - FACA	6,57	37,62	Não

Fonte: Autora (2025).

5.3.5 Dureza

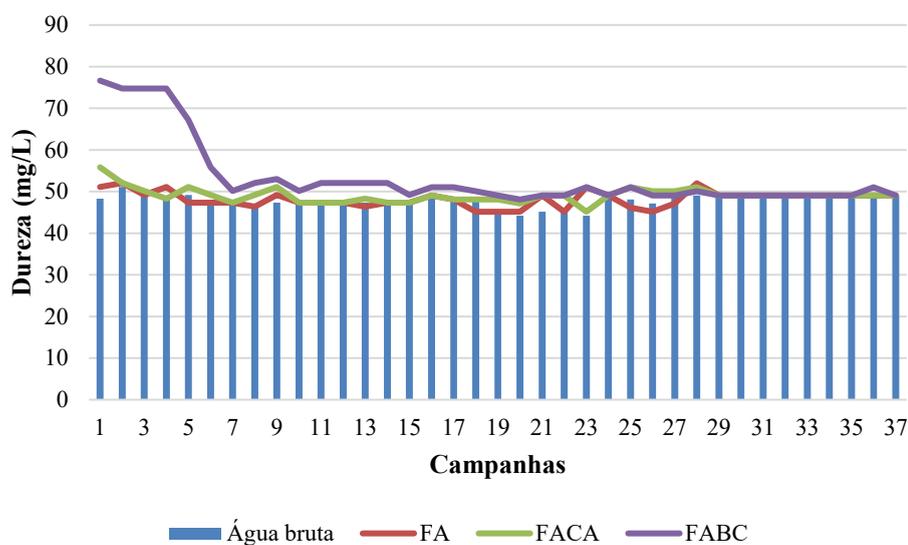
Para todas as análises efetuadas os valores de dureza, de acordo com a Tabela 13 e Figura 32, tanto da água bruta quanto das águas filtradas, mantiveram-se abaixo de 300 mg/L, valor este preconizado em Brasil (2021).

Tabela 13 - Estatística descritiva para o parâmetro dureza (mg/L).

	Água bruta	Filtros		
		FA	FACA	FABC
Média	47,87	48,19	49,07	53,43
Mediana	48,09	49,08	49,08	50,15
Desvio padrão	1,57	1,90	1,79	8,32
Máximo	51,09	52,04	55,83	76,64
Mínimo	44,17	45,15	45,15	48,09

Fonte: Autora (2025).

Figura 32 - Resultado das análises para o parâmetro dureza.



Fonte: Autora (2025).

Todavia, vale mencionar que o FABC apresentou valores mais expressivos quanto ao parâmetro dureza apenas no início da primeira carreira de filtração (Figura 32), o que ocasionou maior média para o parâmetro (Tabela 13), o que pode ser justificado devido ao meio filtrante possuir biocarvão proveniente do cacto, sendo este um material com presença de cálcio (11,86%) e magnésio (2,50%), conforme identificado no ensaio MEV com EDS (item 5.2), tendo em vista que von Sperling (1996) menciona que estes dois elementos químicos são fatores que influenciam o parâmetro. Além disso, como já mencionado, o carbonato de cálcio foi

identificado na análise DRX (item 5.2), sendo o cálcio um dos elementos que formam o composto químico, o que também evidencia a presença do elemento.

De acordo com von Sperling (1996), para valores de dureza menores 50 mg/L a água é considerada como “água mole” e para valores entre 50 a 150 mg/L é considerada como “dureza moderada”. Desse modo, quanto à água bruta, em 97,3% das análises se enquadraram como água mole e em 2,7% como dureza moderada. Para o FA, em 86,5% das análises enquadraram-se como água mole e em 13,5% como dureza moderada, já para FACA, em 75,7% das análises se enquadraram como água mole e em 24,3% como dureza moderada, enquanto, em FABC, em 43,2% das análises a água se enquadraram como água mole e em 56,8% como dureza moderada.

Ressalta-se que, segundo Mota (2010), teores elevados de dureza geram efeitos laxativos e causam sabor desagradável na água, além de reduzir a formação de espuma do sabão, o que aumenta o seu consumo e incrustações nas tubulações. Assim, quanto à diminuição do parâmetro dureza, dentre os filtros avaliados no presente estudo, o FA ocasionou a maior redução, tendo reduzido o parâmetro com relação à água bruta em 16% das análises realizadas, enquanto para FACA ocorreu aumento do parâmetro em 46% das avaliações e FABC ocasionou incrementos em 73% das análises.

Dessa forma, o teste de Shapiro-Wilk indicou que todos os grupos avaliados (p-valor obtido $< 0,05$) não possuíram tendência para distribuição normal. Quando avaliados os resultados quanto às médias observadas, conforme teste de Kruskal-Wallis (p-valor obtido no teste $< 0,05$), de acordo com a Tabela 14, a água bruta foi estatisticamente diferente do FABC, enquanto, entre os filtros, o FABC foi estatisticamente diferente dos demais (FA e FACA), o que corrobora os incrementos do parâmetro, ainda que poucos expressivos, quando utilizado o sistema FABC.

Tabela 14 - Análise estatística entre os resultados para dureza.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
Água bruta - FA	6,95	26,29	Não
Água bruta - FABC	56,82	26,29	Sim
Água bruta - FACA	23,85	26,29	Não
FA - FABC	49,88	26,29	Sim
FA - FACA	16,91	26,29	Não
FABC - FACA	32,97	26,29	Sim

Fonte: Autora (2025).

5.3.6 Ferro total

Conforme a Tabela 15, quanto ao parâmetro ferro total nas análises conduzidas, para água bruta, 72,7% dos resultados foram maiores que o permitido por Brasil (2021), já quanto as águas filtradas, por todos os sistemas de filtração, estes ficaram abaixo do valor permitido por Brasil (2021), sendo este 0,3 mg/L. Além disso, ressalta-se que, 72,7% das análises também apresentaram valores para água bruta acima do permitido por Brasil (2008).

Dessa maneira, todos os filtros apresentaram eficiências de remoção de ferro total, chegando a apresentar valores abaixo dos limites de quantificação dos métodos utilizados em 36,4% dos resultados de FA, 45,5% para o FACA e 18,2% dos valores para o FABC. Vale mencionar que a partir do terceiro mês de monitoramento (primeira carreira de filtração), foram obtidos valores abaixo dos limites de quantificação. Ademais, foram obtidos para FA média de remoção do parâmetro em cerca de 77,9%, enquanto para FACA foi em torno de 81,0%, e para FABC cerca de 90,3%. Assim, as análises de ferro realizadas demonstraram significativa efetividade dos filtros na remoção do metal ferro.

Tabela 15 - Resultados das análises de ferro total (mg/L).

Data da coleta	AB	FA	FACA	FABC
27/02/2024	0,208	0,133	0,138	0,019
21/03/2024	0,158	0,041	0,028	0,028
11/04/2024	0,047	<0,016	<0,016	<0,016
09/05/2024	0,701	0,020	<0,004	0,019
13/06/2024	0,425	0,010	0,016	0,009
18/07/2024	2,210	<0,004	<0,004	0,012
15/08/2024	1,010	<0,004	<0,004	0,020
12/09/2024	0,827	0,011	0,009	0,016
10/10/2024	0,566	<0,004	<0,004	<0,004
07/11/2024	0,756	0,270	0,100	0,139
05/12/2024	0,642	0,484	0,456	0,112

Fonte: Autora (2025).

Frisa-se que, com o uso de meios filtrantes alternativos, Eniola e Sizirici (2023), obtiveram remoções de ferro superiores a 60% utilizando meio filtrante composto por biocarvão de tamareira e areias. Além disso, ao que tange a remoção de íons metálicos diversos, Choudhary, Kumar e Neogi (2020), ao avaliarem a adsorção dos íons metálicos Cu^{+2} e Ni^{+2} ,

com o uso de biocarvão de cacto em água sintética, obtiveram resultados significativos de remoção, sendo obtido remoções de Cu^{+2} e Ni^{+2} maiores que 22% e 50 %, respectivamente.

Ainda, todos os grupos avaliados, conforme o teste de Shapiro-Wilk indicou que (p-valor obtido $< 0,05$) estes não possuíram tendência para distribuição normal. Conforme a Tabela 16, quando avaliados os resultados quanto as médias observadas, de acordo com o teste de Kruskal-Wallis (p-valor obtido no teste $< 0,05$), os valores de água bruta foram estatisticamente diferentes de todos os valores dos filtros avaliados, enquanto entre os filtros não houve diferenças estatísticas, o que caracteriza que de fato os tratamentos proporcionaram mudanças quanto ao parâmetro ferro total quando comparados água bruta e água tratada.

Tabela 16 - Análise estatística entre os resultados para ferro total.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
Água bruta - FA	19,41	14,45	Sim
Água bruta - FABC	19,27	14,45	Sim
Água bruta - FACA	21,50	14,45	Sim
FA - FABC	0,14	14,45	Não
FA - FACA	2,09	14,45	Não
FABC - FACA	2,23	14,45	Não

Fonte: Autora (2025).

5.3.7 Coliformes totais e termotolerantes

Quanto aos valores de coliformes totais (Tabela 17), os valores para água bruta das análises realizadas, mantiveram-se fora do estabelecido em Brasil (2021), que preconiza a ausência do parâmetro em 100 mL de amostra. Contudo, as remoções do parâmetro no FABC foram as mais significativas, sendo em 72,7% das análises obtidos valores menores que os limites de quantificação dos métodos utilizados ($< 1,8$ NMP/100mL), seguido do FA, com 54,5% das análises sendo obtidos valores menores que os limites de quantificação, e do FACA com 36,7% dos resultados abaixo dos limites de quantificação dos métodos. Ainda, quanto as médias de eficiência de remoção, estas foram em torno de 76,7%, 72,0%, 86,1%, para FA, FACA e FABC, respectivamente.

Tabela 17 - Resultados das análises de coliformes totais (NMP/100mL).

Data da coleta	AB	FA	FACA	FABC
27/02/2024	3,3 x 10	6,8	3,3 x 10	<1,8
21/03/2024	2,3 x 10	2,0	2,0	<1,8
11/04/2024	2,6 x 10 ²	<1,8	1,1 x 10	2,0
09/05/2024	1,3 x 10 ³	<1,8	2,0	<1,8
13/06/2024	7,0 x 10 ²	6,8 x 10 ³	3,3 x 10 ²	9,3 x 10
18/07/2024	7,9 x 10	2,0	<1,8	<1,8
15/08/2024	7,9x10 ³	<1,8	2,0	<1,8
12/09/2024	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8
10/10/2024	4,7x10	<1,8	<1,8	<1,8
07/11/2024	1,7x10	<1,8	<1,8	<1,8
05/12/2024	2,2x10	2,0	6,8	2,0

Fonte: Autora (2025).

Ressalta-se que, apenas em uma análise para água tratada, com o uso do FA, foi obtido valor de coliformes totais maior ($6,8 \times 10^3$ NMP/100mL) que o de água bruta ($7,0 \times 10^2$ NMP/100mL), contudo, esta análise ocorreu um tempo após a limpeza do meio filtrante (segunda carreira de filtração), sendo possível ter ocorrido a desestabilização da camada biológica durante a limpeza do meio filtrante, o que pode ter liberado microrganismos presentes na camada biológica na água tratada até a sua reestruturação, contudo, nas campanhas seguintes, observou-se que o filtro retomou as condições de remoções que possuía anteriormente.

Ao que tange os coliformes termotolerantes (Tabela 18), apesar dos valores de água bruta não se enquadrarem com o estabelecido nas legislações, as remoções também foram evidentes dados os tratamentos propostos, obtendo em cerca de 78,8% das análises valores inferiores aos limites de quantificação dos métodos utilizados, sendo FA e FABC com 81,8%, e FACA com 72,7% dos resultados menores que os limites. Ademais, as médias de eficiência de remoção foram em torno de 49,6%, 48,9%, 49,9%, para FA, FACA e FABC, respectivamente.

Tabela 18 - Resultados das análises de coliformes termotolerantes (NMP/100mL).

Data da coleta	AB	FA	FACA	FABC
27/02/2024	4,5	<1,8	<1,8	<1,8
21/03/2024	2,0	<1,8	<1,8	<1,8
11/04/2024	2,6 x 10 ²	<1,8	1,1 x 10	2,0
09/05/2024	7,9 x 10	<1,8	<1,8	<1,8
13/06/2024	3,3 x 10 ²	1,7 x 10	2,6 x 10	7,8
18/07/2024	7,9 x 10	2,0	<1,8	<1,8
15/08/2024	1,3 x 10	<1,8	2,0	<1,8
12/09/2024	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8
10/10/2024	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8
07/11/2024	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8
05/12/2024	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8

Fonte: Autora (2025).

Com o uso de filtro com areia, Santos, Lima e Michelan (2023), alcançaram remoção de 84,75% para coliformes totais e 92,35% para coliformes termotolerantes. Lima (2020a), por sua vez, com filtro com areia, obteve remoção de coliformes totais em cerca de 71,72% e de coliformes termotolerantes de 89,91%. Oliveira Neto, Souza e Sens (2020) obtiveram remoção de coliformes totais de 97% com o uso de filtro com areia e de 75% com filtro com carvão granular ativado e areia. Eniola e Sizirici (2023), com o uso de biocarvão de tamareira e areia como meio filtrante, observaram remoção de coliformes totais superiores a 90%. Assim, se nota que os filtros lentos com materiais convencionais e não convencionais possuem eficiência de remoção expressiva quanto aos patógenos citados.

Além disso, conforme estudo estatístico os conjuntos de dados não seguiram distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk com p-valor < 0,05 para todos os grupos avaliados). Assim, conforme teste de Kruskal-Wallis (Tabela 19), quando comparadas as médias dos conjuntos de dados, no qual se obteve p-valor < 0,05 para as avaliações, nota-se que para as análises de coliformes totais os valores de água bruta foram estatisticamente diferentes que os de FA e FABC, enquanto que foram estatisticamente iguais aos de FACA, o que corrobora os valores observados na Tabela 17, dado esta ter sido a metodologia que, inclusive, apresentou menor porcentagem quanto aos valores abaixo dos limites de quantificação e menor porcentagem de remoção.

Tabela 19 - Análise estatística entre os resultados para coliformes totais e termotolerantes.

Coliformes totais			
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
Água bruta - FA	16,14	14,45	Sim
Água bruta - FABC	19,50	14,45	Sim
Água bruta - FACA	12,36	14,45	Não
FA - FABC	3,36	14,45	Não
FA - FACA	3,77	14,45	Não
FABC - FACA	7,14	14,45	Não
Coliformes termotolerantes			
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Diferença
Água bruta - FA	13,33	14,51	Não
Água bruta - FABC	13,29	14,81	Não
Água bruta - FACA	10,97	14,81	Não
FA - FABC	0,03	14,15	Não
FA - FACA	2,35	14,15	Não
FABC - FACA	2,32	14,45	Não

Fonte: Autora (2025).

Já quanto os resultados para coliformes termotolerantes, também dispostos na Tabela 19, observa-se que estes foram ainda estatisticamente iguais quando comparados os valores de água bruta com água tratada, contudo, frisa-se que, foram observadas remoções do parâmetro para todos os filtros desde a primeira carreira de filtração, assim como para o parâmetro coliformes totais.

5.4 Análise dos parâmetros na coagulação/floculação

Os dados avaliados quanto à coagulação/floculação utilizaram a metodologia determinada conforme descrito nos itens 4.2 e 4.3. Deste modo, o estudo ocorreu em 7 campanhas, entre fevereiro e abril de 2024, com o intuito de realizar a análise dos parâmetros de qualidade utilizando 7 dosagens do coagulante/floculante, sendo estas: 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 4,0, 5,0 e 6,0 mL. Assim, para os parâmetros avaliados, a melhor dosagem, sendo esta a qual promoveu melhor eficiência no tratamento abordado, foi a de 1,5 mL, sendo os parâmetros obtidos percorridos neste tópico utilizados para posterior análise estatística quanto os resultados do FABC.

5.4.1 Água bruta

Os valores encontrados na estatística descritiva para água bruta estão dispostos na Tabela 20, que elucida a estatística descritiva dos parâmetros obtidos para água bruta (média, mediana, desvio padrão, valor máximo e mínimo). Ressalta-se que a dosagem que proporcionou para a água bruta as melhores eficiências de remoção dos parâmetros de qualidade avaliados, foi a dosagem de 1,5 mL.

Tabela 20 - Análise estatística entre os resultados para água bruta.

	Cor Aparente (uH)	Cor Verdadeira (uH)	Turbidez (uT)	Temperatura (°C)	pH	Ferro total (mg/L)	DQO (mg/L)
Média	11,29	0,57	1,14	27,54	-	0,19	75,68
Mediana	11,00	0,00	1,00	27,70	7,40	0,15	48,04
Desvio padrão	8,79	1,51	1,21	0,70	0,52	0,21	55,62
Máximo	26,00	4,00	3,00	28,60	7,80	0,63	180,87
Mínimo	0,00	0,00	0,00	26,80	6,60	0,02	25,11

Fonte: Autora (2025).

Assim, conforme os valores obtidos, a água bruta na campanha com o uso da dosagem ótima (1,5 mL), quanto ao atendimento da legislação vigente, disposto em Brasil (2021), os parâmetros cor aparente (26 uH) e ferro total (0,63 mg/L), encontraram-se acima dos valores máximos permitidos, sendo estes para os parâmetros cor aparente e ferro total, 5 uH e 0,3 mg/L, respectivamente. Vale mencionar que o valor do parâmetro ferro total para água bruta também ficou acima do permitido por Brasil (2008). Os demais parâmetros estabelecidos na legislação, pH e turbidez, mantiveram-se dentro do preconizado.

5.4.2 Água coagulada/floculada

Os valores da estatística descritiva para água tratada estão dispostos na Tabela 21. Ainda, vale mencionar que, alíquotas de água passaram por processo de filtração em membrana e bomba a vácuo, após os processos de coagulação, floculação e decantação.

Tabela 21 - Resultados das análises para água tratada.

	Cor Aparente (uH)	Turbidez (decantação) (uT)	Temperatura (°C)	pH	Ferro Total (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor Verdadeira (uH)	Turbidez (filtração) (uT)
Máximo	17,50	1,50	28,00	8,00	0,10	78,57	2,00	0,50
Mínimo	5,50	0,00	26,15	6,30	0,01	0,00	0,00	0,00
Média	10,86	0,71	27,33	-	0,04	27,80	0,50	0,14
Mediana	11,00	0,50	27,50	7,05	0,04	24,45	0,00	0,00
Desvio padrão	4,12	0,64	0,71	0,56	0,04	26,19	0,87	0,24

Fonte: Autora (2025).

a) Cor aparente e turbidez

Ao se utilizar a dosagem ótima, a cor aparente após a decantação (6,50 uH) se enquadrou no estabelecido em Brasil (2021), por ser menor que 15 uH. Além disso, esta apresentou redução de 75% do seu valor inicial, após decantação, e ainda, após a filtração foi obtida remoção de 100% do parâmetro. Já quanto à turbidez, após o tratamento, foi obtida remoção de 100% do parâmetro (seja após decantação ou após filtração).

Miller *et al.* (2008), avaliaram sistematicamente o mecanismo de coagulação do gênero *Opuntia* spp., utilizando água sintética, sendo observado que o gênero de plantas citado opere predominantemente por mecanismo de coagulação por ponte, além de proporcionar redução de 98% na turbidez. De acordo com o presente estudo, após o processo de coagulação/floculação, tornou-se possível observar redução da turbidez, tendo em vista que os flocos coagulados/floculados se tornam mais pesados e tendem a se depositar no fundo do recipiente de análise.

Zara, Thomazini e Lenz (2012), ao aplicarem *Cereus jamacaru*, espécie de cacto diferente da utilizada no presente estudo, como auxiliar do coagulante químico sulfato de alumínio, nos processos de coagulação e floculação, utilizaram soluções de extração, como a água destilada, para tratar a água do rio Toledo no estado do Paraná, obtendo eficiência de remoção de turbidez de 28,1%, com o uso de 1 mL de extrato de cacto.

Goes *et al.* (2017), obtiveram remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez superiores a 90%, ao utilizarem a espécie de cacto *Opuntia cochenillifera* como coagulante para tratar a água Lago Igapó II no estado do Paraná, com as etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração. Ademais, os autores aplicaram NaCl 1% e NaOH 0,10

mol L⁻¹, associados como solução extratora, sendo as dosagens utilizadas de 1 mg/L, 4 mg/L e 7 mg/L.

Assim, conforme os valores discutidos e fornecidos por autores na avaliação de remoção de cor e turbidez, nota-se que o coagulante/floculante, oriundo do cacto, possibilita eficiência de remoção quanto aos parâmetros de qualidade.

b) Temperatura e pH

Os valores de pH, com a utilização da dosagem ótima, após tratamento (6,70 e 6,40) permaneceram dentro da faixa estabelecida em Brasil (2021), que determina que os valores mantenham-se entre 6,0 e 9,0. Também foi possível notar que não houve oscilações expressivas no parâmetro, quando comparado com a água bruta (6,70). Conforme Mota (2010), águas com pH alto tendem a causar incrustações nas tubulações, enquanto, águas com pH baixo tendem a tornar a água corrosiva, evidenciando a importância deste parâmetro estar dentro do preconizado na legislação.

Assim como o pH, a temperatura também não apresentou oscilação expressiva quando comparada com o valor obtido para água bruta, sendo 26,80 °C para a água bruta e de 27,05 °C para a água tratada, sendo assim um fator positivo, uma vez que, de acordo com Mota (2010), a temperatura exerce influência significativa na água, em face da sua influência nas propriedades desta, como oxigênio dissolvido, densidade e viscosidade.

c) Ferro total

Após o tratamento, o parâmetro ferro total passou a se enquadrar com o estabelecido em Brasil (2021), sendo que, com uso da dosagem ótima, passou de 0,63 mg/L para 0,02 mg/L, sendo 0,3 mg/L o valor máximo estabelecido. Desta forma, após o tratamento avaliado, foi obtida remoção de cerca de 97% do parâmetro.

É de suma importância que os limites estabelecidos na legislação sejam atendidos, pois, segundo von Sperling (1996), o elemento ferro se encontrado em pequenas concentrações pode ocasionar problemas na cor da água, enquanto, se encontrado em concentrações elevadas, pode ocasionar odor e sabor, o que reduz a aceitação da água pelo consumidor.

d) DQO

Apesar de não haver recomendação do padrão de potabilidade quanto a DQO para água subterrâneas, Henriques *et al.* (2014) citam que a Demanda Química de Oxigênio (DQO) quantifica, de forma equivalente, a quantidade de oxigênio requerida para oxidar a matéria orgânica presente na água. Deste modo, ressalta-se que, após o tratamento com o cacto como coagulante/floculante, ao se utilizar a dosagem ótima, foi obtida 100% de remoção do parâmetro, o que demonstra um indicativo de que o tratamento tem capacidade de remover compostos que possam contribuir para o incremento da DQO.

5.5 Comparação: resultados com coagulação/floculação versus FABC

Dado o teste de Wilcoxon, ao avaliar os resultados de água tratada com o uso da coagulação/floculação para a dosagem ótima e com o uso do FABC, o p-valor obtido quando comparados os parâmetros de qualidade cor aparente, turbidez, pH, temperatura e ferro total, estão ilustrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados da análise estatística entre os tratamentos.

Parâmetros	p-valor
Cor aparente	$1,15 \times 10^{-10}$
Turbidez	$8,02 \times 10^{-5}$
pH	$2,75 \times 10^{-5}$
Temperatura	$8,94 \times 10^{-13}$
Ferro total	$6,83 \times 10^{-1}$

Fonte: Autora (2025).

Dessa forma, observa-se que, quando analisadas as médias dos parâmetros, de acordo com os resultados do teste de Wilcoxon (Tabela 22), ao nível de confiança de 95%, para o parâmetro ferro total os tratamentos não apresentaram diferenças estatisticamente significativa ($p \text{ valor} > 0,05$), ao passo que, para os demais parâmetros (cor aparente, turbidez, pH e temperatura) foram apresentadas diferenças estatisticamente significativas.

Assim, as diferenças estatísticas demonstraram que os tratamentos possuem respostas diferentes para alguns dos parâmetros avaliados, contudo, como já mencionado, ambos os tratamentos proporcionaram remoções significativas, sendo este fator positivo em ambas as metodologias alternativas avaliadas, tendo em vista que, de acordo com Santos, Rosa e Michelin (2024), um dos propósitos dos tratamentos alternativos é proporcionar soluções simplificadas que atendam aos mais aquém quanto ao fornecimento seguro de água.

6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

No desenvolvimento do estudo foram identificadas algumas limitações, sendo estas:

- Rendimento do biocarvão: o rendimento do biocarvão demonstrou-se reduzido (em torno de 35%), contudo, essa limitação é compensada pela facilidade de obtenção da matéria-prima.
- Baixa vazão: o experimento foi conduzido com baixa vazão ($3 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), assim, ressalta-se que, para que o sistema pudesse atender às demandas de uma residência, seria necessária área superficial mais expressiva.
- Área superficial do biocarvão: o biocarvão apresentou características de área superficial e porosidade significativamente distintas do carvão ativado, uma vez que, o carvão ativado foi submetido a processos específicos para a melhoria do desempenho. Entretanto, as propriedades intrínsecas do biocarvão demonstram-se satisfatórias no tratamento de água.

Além disso, frisa-se que, as limitações mencionadas não comprometeram a viabilidade do estudo, nem impediram o avanço da pesquisa e a obtenção de informações relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

7 CONCLUSÕES

Conforme os resultados adquiridos no presente estudo com utilização do cacto no tratamento de água, considerado material abundante em especial na região do nordeste brasileiro, contribuiu-se com a propagação do uso de material sustentável, que proporcionam benefícios à população e ao meio ambiente, além de disponibilizar mais informações voltadas ao tratamento de água.

Dessa forma, ao se caracterizar os carvões utilizados nos meios filtrantes, o carvão comercial ativado (CA) apresentou maior área superficial em ambos os modelos em relação ao biocarvão (BC), sendo verificado no BC superfície e poros heterogêneos, com algumas cavidades abertas, profundas e arredondadas, enquanto o CA apresentou superfície mais porosa e distribuição mais uniforme dos poros. Ademais, no CA e BC foram identificados elementos conforme as suas fontes de biomassa, além de se observar que ambos possuem estruturas que combinam características amorfas e cristalinas, sendo, portanto, ambos os materiais promissores para o tratamento de água.

Na etapa de filtração, os testes estatísticos indicaram não haver diferença significativa entre os filtros convencionais e não convencionais para cor aparente, turbidez, condutividade elétrica e ferro total, havendo diferenças entre a água bruta e a filtrada, indicando que os tratamentos alteram esses parâmetros. Ainda, no que tange aos parâmetros de coliformes totais, apesar da remoção significativa dos parâmetros, evidenciou-se a necessidade da etapa de desinfecção após a filtração. Na etapa de coagulação/floculação, houve remoção total da cor verdadeira, turbidez e DQO, além de que, quanto à temperatura e ao pH, em todas as metodologias avaliadas, estes se mantiveram estáveis.

Desse modo, quando comparados os tratamentos (filtração lenta e coagulação/floculação), observou-se que, dentre os parâmetros avaliados, apenas o parâmetro ferro total não apresentou diferenças estatisticamente significativas, explicitando que as metodologias possuem comportamentos diferentes para os parâmetros, contudo, ambos proporcionaram remoções significativas nos parâmetros avaliados.

Assim, conforme os resultados apresentados, ambas as soluções alternativas trouxeram resultados expressivos quanto à melhoria dos parâmetros de qualidade de água avaliados, podendo estas serem soluções aptas a mitigar a disparidade na distribuição de água com qualidade entre regiões rurais e urbanas. Portanto, sugere-se que os tratamentos alternativos avaliados na presente pesquisa possam ser utilizados na substituição dos tratamentos

convencionais, a depender das necessidades populacionais, tendo em vista a importância da disponibilização de água potável para as comunidades rurais.

8 PERSPECTIVAS FUTURAS

Durante o desenvolvimento deste estudo, identificaram-se tópicos para pesquisas futuras que podem ampliar a compreensão dos temas avaliados, sendo estes:

- Otimização dos métodos: futuras pesquisas podem focar na otimização dos métodos de tratamento, como a variação das condições de pirólise para melhorar o rendimento do biocarvão ou a combinação de diferentes tipos de biomassa.
- Aplicação em larga escala: testar a aplicação dos métodos em larga escala, especialmente em comunidades rurais, para avaliar a viabilidade econômica e operacional.
- Impacto ambiental: investigar o impacto ambiental dos métodos propostos, como a pegada de carbono da produção de biocarvão ou o potencial de contaminação da água tratada.
- Combinação com outras tecnologias: explorar a combinação dos métodos de tratamento com outras tecnologias, como a desinfecção solar ou o uso de membranas, para melhorar a eficiência do tratamento.
- Estudos de longo prazo: realizar estudos de longo prazo para avaliar a durabilidade e a eficácia dos métodos de tratamento ao longo do tempo, especialmente em condições reais de uso.
- Monitoramento de parâmetros: avaliar outros parâmetros de qualidade da água (metais e compostos químicos) dispostos na legislação vigente.
- Ensaios de caracterização: realizar outros ensaios de caracterização (FRX e TGA), em especial, no biocarvão, tendo em vista a limitação de estudos na literatura acerca do tema.
- Investigação de mecanismos: investigar os mecanismos de coagulação e floculação proporcionado pelo coagulante/floculante natural proveniente do cacto.
- Matrizes de água: avaliar a eficiência dos tratamentos discutidos em outras matrizes de água bruta.

Observa-se, portanto, um vasto campo de investigações teóricas e experimentais proporcionado por esta pesquisa. Assim, recomenda-se explorar os temas descritos, dada a importância do desenvolvimento da linha de pesquisa abordada e sua relevância para a literatura.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. V. da C.; RAMOS, R. de O.; SÁTIRO, J. R.; CANTO, C. S. A. do; LOPES, W. S. Avaliação do desempenho de filtros lentos como tecnologia para potabilização de água: uma revisão. **Anais**. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v.7, 2019.

ALTAMIRANO, E. D. A.; LÉVANO, J. E. R. Y.; YAPU, M. A. C. Uso de la “Opuntia ficus indica”, como agente natural para el tratamiento de aguas, a nivel de laboratorio, UMA. **Ñawparisun - Revista de Investigación Científica de Ingenierías**, v. 2, n. 4, 2020.

AMIRTHARAJAH, A. Some Theoretical and Conceptual Views of Filtration. **Journal American Water Works Association**, v. 80, n. 12, p. 36-46, 1988.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: informe anual**. Brasília: ANA, 105 p., 2023.

ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M. de; PALÁCIO, H. A. de Q.; FROTA JUNIOR, J. I.; SANTOS, J. C. N. dos. Identificação dos íons determinantes da condutividade elétrica nas águas superficiais da Bacia do Curu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 3, p. 346-355, 2009.

ATHAYDE JÚNIOR, G. B.; NÓBREGA, C. C.; GADELHA, C. L. M.; SOUZA, I. M. de F.; FAGUNDES, G. de S. Efeito do antigo Lixão do Roger, João Pessoa, Brasil, na qualidade da água subterrânea local. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 4, n. 1, p. 142-155, 2009. DOI: 10.4136/ambi-agua.79

BITTENCOURT, T. R. S.; SILVEIRA, F. J. L.; MENDES, F. M. T.; TONIOLO, F. S.; GASPARGAR, A. B. Adsorção de cromo hexavalente com carvão ativado proveniente de diferentes biomassas. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 5, p. 301-304, 2018. DOI: 10.5151/cobeq2018-PT.0091

BOAS, L. A. V.; BONFIM, C. dos S.; PIRES, G. P.; SOUZA, I. F. Q. da S.; SILVA, T. L. da. Avaliação de parâmetros físico-químicos de qualidade da água da barragem Tutu Reuter no município de Montanha, ES, Brasil. **Revista Ifes Ciência**, v. 9, n. 1, p. 01-12, 2023. DOI: 10.36524/ric.v9i1.1699

BONGIOVANI, M. C.; KONRADT-MORAES, L. C.; BERGAMASCO, R.; LOURENÇO, B. S. S.; TAVARES, C. R. G. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 2, p. 167-170, 2010. DOI: 10.4025/actascitechnol.v32i2.8238

BORGES, F. M.; SILVA, F. P. da.; CARVALHO, M. C.; GUALBERTO FILHO, A. Desenvolvimento e criação de uma unidade produtiva de carvão ativado. **Anais**. 23º Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2003.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Caderno técnico: projeto e operação de filtros lentos retrolaváveis para o tratamento de água para abastecimento**.

Fundação Nacional de Saúde; Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 64 p., 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria do Gabinete do Ministro (GM) do Ministério da Saúde (MS) nº 888, de 04 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. **Gabinete do Ministério**. 29 p., 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Portaria nº 396, de 07 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, v.66, p. 64-68, 2008.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012.

CARVALHO, R. S. de. **Produção e caracterização de biocarvão de bagaço de laranja para utilização no pós-tratamento de água residuária**. 2018. 150f. Tese (Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2018.

CAVALCANTE, A.; TELES, M.; MACHADO, M. **Cactos do semiárido do Brasil: guia ilustrado**. Campina Grande: INSA, 103 p., 2013.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Apêndice D - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade**, 46 p., 2013.

CHEN, Y.; ZHU, Y.; WANG, Z.; LI, Y.; WANG, L.; DING, L.; GAO, X.; MA, Y.; GUO, Y. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process - A review. **Advances in colloid and interface science**, v. 163, n. 1, p. 39-52, 2011. DOI: 10.1016/j.cis.2011.01.006

CHOQUE-QUISPE, D.; CHOQUE-QUISPE, Y.; SOLANO-REYNOSO, A. M.; RAMOS-PACHECO, B. S. Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. **Tecnología Química**, v. 38, n. 2, p. 298-309, 2018.

CHOUDHARY, M.; KUMAR, R.; NEOGI, S. Activated biochar derived from *Opuntia ficus-indica* for the efficient adsorption of malachite green dye, Cu²⁺ and Ni²⁺ from water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 392, p. 122441, 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122441

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados**, v. 22, p. 61-82, 2008. DOI: 10.1590/S0103-40142008000200005

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1, 350 p., 2013.

CORDOVA-TORRES, A. V.; MENDOZA-MENDOZA, J. C.; BERNAL-SANTOS, G.; GARCÍA-GASCA, T.; KAWAS, J. R.; COSTA, R. G.; JACOBO, C. M.; ANDRADE-MONTEMAYOR, H. M. Nutritional composition, in vitro degradability and gas production of *Opuntia ficus indica* and four other wild cacti species. **Life Science Journal**, v. 12, n. 2s, 2015.

COSTA, H. P.; SANTOS, R. N. dos; RIBEIRO, L. P. D.; PINTO, O. R. de O; PINTO, C. M.; COSTA, D. R.; ALCÓCER, J. C. A. Produção e uso de filtros de água com carvão ativado derivado de matérias sustentáveis. **Journal of Health & Biological Sciences**, v. 10, n. 1, p. 1-7, 2022. DOI: 10.12662/2317-3206jhbs.v10i1.4387.p1-7.2022

COSTA JUNIOR, S. S. da. **Carvão ativado produzido a partir do endocarpo de coco da baía (Coccus Nucifera) aplicado no tratamento de efluente têxtil**. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2014.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. 2024. Disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/index.php>. Acesso em: 23 de dezembro de 2024.

DALSASSO, R. L.; SENS, M. L. Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxiclreto de alumínio: Estudo com água de manancial eutrofizado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, p. 241-249, 2006. DOI: 10.1590/S1413-41522006000300007

DAMASCENO, N. L. de A. **Relatório técnico de perfuração de poços tubulares**. São Cristóvão: Sondar - Hidrogeologia Consultoria e Perfuração Ltda, 2010.

DAVET, A. **Estudo Fitoquímico e biológico do cacto – Cereus jamacaru de Candolle, Cactaceae**. 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparação de Amostras: Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 60 p., 2007.

DI BERNARDO, L; DANTAS, Â. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 792 p., 2005.

DORS, P. **Biocarvões de casaca de banana e de pinus: caracterização e uso na remoção de zinco**. 2022. 69f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, 2022.

DUARTE, L. D. C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; BRUM, T. M. M. D.; CHODUR, N. L.; LICCARDO, A., FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, vol. 30, n. 2, p. 3-15, 2003. DOI: 10.22456/1807-9806.19585

ELHLELI, H.; MANNAI, F.; MOSBAH, M BEN.; KHIARI, R.; MOUSSAOUI, Y. Biocarbon Derived from Opuntia ficus indica for p-Nitrophenol Retention. **Processes**, v. 8, n. 10, p. 1242, 2020. DOI: 10.3390/pr8101242

ENIOLA, J. O.; SIZIRICI, B. Investigation of biochar-modified biosand filter performance for groundwater treatment for drinking water purposes: A laboratory and pilot scale study. **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, p. 103914, 2023. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103914

FERRAZ, R. L. de S.; DANTAS NETO, J.; COSTA, P. da S.; LIMA, A. S. de; SILVA, P. F. de; MATOS, R. M. de. Composição mineral da palma forrageira variedade baiana sob níveis de reposição de água no solo. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 3, p. 319-328, 2020. DOI: 10.24221/jeap.5.3.2020.3096.319-328

FERREIRA, L. A.; PIMENTEL, E. T.; SILVA, R. B. P.; SANTOS, A. A. Avaliação da qualidade de potabilidade da água subterrânea em áreas rurais no município de Humaitá/AM. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.1, p.721-729, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0058

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'EDLIA, M.; PARIS, M. **Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies**. The World Bank: Washington, 2002.

FREGONESI, B. M.; SAMPAIO, C. de F.; RAGAZZI, M. F.; TONANI, K. A. de A.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. Cryptosporidium e Giardia: desafios em águas de abastecimento público. **O Mundo da Saúde**, v. 36, n. 4, p. 602-609, 2012. DOI: 10.15343/0104-7809.2012364602609

FROTA, M. N. L. da; CARNEIRO, M. S. de S.; CARVALHO, G. M. C.; ARAÚJO NETO; R. B. de. **Palma Forrageira na Alimentação Animal**. Documentos Embrapa Meio-Norte, 47 p., 2015.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 4 ed. Brasília: FUNASA, 150 p., 2013

GOES, A. S. F.; REIS, M. L. C.; SCALCON, A.; SAIBERT, C. L. Obtenção de micropartículas biodegradáveis a partir do resíduo de cascas de laranja pêra (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). **Revista Foco**, v. 16, n. 12, p. e3511-e3511, 2023. DOI: 10.54751/revistafoco.v16n12-016

GOES, H. H.; SOUZA, R. C. de; MELO, J. de; THEODORO, J. D. Estudo da Aplicação do Cacto *Opuntia Cochenillifera* do Tratamento de Água. **Enciclopedia Biosfera**, v. 14, n. 25, 2017. DOI: 10.18677/EnciBio_2017A50

GONZÁLEZ-GARCÍA, P. Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1393-1414, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.117

HELLER, L; PÁDUA, V. L. de. **Abastecimento de água para consumo humano**. Editora UFMG. 2ª Edição, 2010.

HENRIQUES, J. A.; OLIVEIRA, R. de; MEIRA, C. M. S.; NASCIMENTO, R. S. do; SANTOS, E. C. dos. Potencial de uso da Moringa oleifera Lamarck na clarificação de água para abastecimento em comunidades difusas de áreas semiáridas. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)**, Rio de Janeiro, n. 31, p. 76-83, 2014.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 66 p., 2019.

HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow sand filtration**. Geneva: World Health Organization, 122 p., 1974.

HYMNÔ, F.; PIZZOLATTI, B. S.; SENS, M. L. Filtração lenta com retrolavagem: meio filtrante e sua influência na qualidade de água e comparação com o processo convencional por raspagem. **Anais**. XII Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Características gerais dos domicílios e dos moradores 2019**. 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101654>. Acesso em: 27 de junho de 2024.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 104p., 2012.

KALINKE, C. **Avaliação da potencialidade eletroanalítica de biochar, obtido em diferentes temperaturas, em eletrodos modificados para determinação de espécies de interesse**. 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

KOSHELEVA, R. I.; MITROPOULOS, A. C.; KYZAS, G. Z. Synthesis of activated carbon from food waste. **Environmental Chemistry Letters**, v. 17, p. 429-438, 2019. DOI: 10.1007/s10311-018-0817-5

LEHMANN, J.; STEPHEN, J. **Biochar for environmental management: an introduction**. Earthscans, UK, 404p., 2009.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Editora Átomo, 640 p., 2010.

LIMA, A. de J. **Análise comparativa da eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencional e não convencionais**. 2020. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2020a.

LIMA, C. B. **Cacto mandacaru (Cereus jamacaru): coagulante como auxiliar no tratamento de água**. 2020. 75f. Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica). Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba, 2020b.

LIMA, J. P. M.; ROLLEMBERG, S. Técnicas simplificadas de tratamento de água. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 2, 2020. DOI: 10.21577/1984-6835.20200036

LIMA JÚNIOR, R. N.; ABREU, F. O. M. S. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes para tratamento de águas: uma revisão sobre benefícios e potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, 2018. DOI: 10.21577/1984-6835.20180052

LÖBLER, C. A.; BORBA, W. F. de; SILVA, J. L. S. da. Relação entre a pluviometria e a condutividade elétrica em Zona de Afloramento do sistema Aquífero Guarani. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, p. 115-121, 2015. DOI: 105902/2179460X15833

LOZANO, K. P. C.; MENDOZA, J.; AGUAS, Y.; MENDOZA, G. S.; VERBEL, R. O.; ORTEGA, G. P. M. O Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementário na clarificação da água. **Producción+ Limpia**, v. 10, n. 1, p. 40-50, 2015.

MAAOUI, A.; TRABELSI, A. B. H.; HAMDI, M.; CHAGTMI, R.; JAMAAOUI, F.; LOPEZ, G.; CORTAZAR, M.; OLAZAR, M. Towards local circular economy through *Opuntia Ficus Indica* cladodes conversion into renewable biofuels and biochars: Product distribution and kinetic modelling. **Fuel**, v. 332, p. 126056, 2023. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126056

MICHELAN, D. C. de. G. S.; SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L. Comparação da duração da carreira de filtração entre filtro lento com limpeza convencional e retrolavável. **Scientia Plena**, v. 11, n. 11, 2015. DOI: 10.14808/10.14808/sci.plena.2015.113303

MILLER, S. M.; FUGATE, E. J.; CRAVER, V. O.; SMITH, J. A.; ZIMMERMAN, J. B. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. **Environmental science & technology**, v. 42, n. 12, p. 4274-4279, 2008. DOI: 10.1021/es7025054

MIRANDA, L. A. S.; MONTEGGIA, L. O. **Sistemas e processos de tratamento de águas**. Porto Alegre: (S.n), 148 p., 2007.

MOREIRA, J. M.; PÉREZ-MARIN, A. P.; ARAÚJO, J. S.; LAMBAIS, G. R.; SALES, A. T. Nutrients demand of cactus forage. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 811-820, 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.2.p811-820

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 4. ed. Rio de Janeiro: Abes, 2010.

MOURA, R. R. de; CASTRO, B C.; SOUZA, A. T. de. Síntese, caracterização e avaliação de biocarvão produzido a partir de resíduos de indústrias frigoríficas como potencial energético e possível substrato para plantas. **Colloquium Exactarum**, v. 12, p. 89-101, 2020. DOI: 10.5747/ce.2020.v12.n2.e321

NEVES, F. L.; SPÍNOLA, A. M.; CHAGAS, M. C. M. das; NEVES, J. D. de C.; KUSTER, I. S.; FIGUEIREDO, M. R. P. de; OLIVEIRA, F. S. de; OLIVEIRA, E. F. de; PEREIRA, S. L. **Palma-forrageira: opção e potencialidades para alimentação animal e humana em propriedades rurais do Estado do Espírito Santo**. Vitória: Incaper, Documentos, v. 276, 52 p., 2020.

NUNES, C. dos S. Usos e aplicações da palma forrageira como uma grande fonte de economia para o semiárido nordestino. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 8, 2011. DOI: 10.18378/rvads.v6i1.551

OLIVEIRA, A. P. A. de; LUZ, A. B. **Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração**. CETEM, 2001.

OLIVEIRA, M. D. de; BIANCHI, D. P. Z.; FONSECA, J. F. R. de; GORZA JÚNIOR, N. A.; LIBÂNIO, M. Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 613-625, 2021. DOI: 10.1590/S1413-415220180203

OLIVEIRA NETO, A. de; SOUZA, F. H. de; SENS, M. L. Desenvolvimento e avaliação de um sistema simplificado para potabilização de água combinando as tecnologias da filtração lenta retrolavável e adsorção. **Anais**. 19º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2020.

OLIVEIRA, N. T.; NASCIMENTO, K. P.; GONÇALVES, B. de O.; LIMA, F. C. de; COSTA, A. L. N. da. Tratamento de água com moringa oleífera como coagulante/floculante natural. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 373–382, 2018. DOI: 10.31072/rcf.v9i1.539

OLIVEIRA, V. de M. **Estudo da porosidade de pelotas de minério de ferro para altos-fornos através de adsorção física**. 2010. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

OMS. Organização Mundial da Saúde. **Nutrients in drinking water**. Geneva, World Health Organization, 2005.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Resolution 70/1**. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: UN, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/2U6FeR0>>. Acesso em 11 de abril de 2024.

PANDEY, A. **Handbook of plant-based biofuels**. CRC press, 2008.

PANWAR, N. L.; PAWAR, A. Influence of activation conditions on the physicochemical properties of activated biochar: A review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-23, 2020. DOI: 10.1007/s13399-020-00870-3

PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M. B. D.; MICHELAN, D. C. de G. S.; ROMERO, L. G. Water treatment for rural areas by slow sand filtration. **Anais**. 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment, 2010.

PURCHAS, D. B.; SUTHERLAND, K. **Handbook of Filter Media**. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier Science Ltd, 2002.

REINOSO, R. F.; MARSH, H. **Activated carbon**. 1. ed. London: Elsevier, 2006.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blücher, 352 p., 2009.

RISS, J. S. P.; FARIAS, L. R.; SOUZA, V. P.; ARAÚJO, G. Í.; VITAL, M. J. S. Efeito do cacto amazônico (*Cereus Jamacaru*) como coagulante natural para a remoção da turbidez de águas superficiais. **Periódico Tchê Química**, v. 19, n. 42, 2022. DOI: 10.52571/PTQ.v19.n42.2022.03_RISS_pgs_29_36.pdf

ROCHA JÚNIOR, F. R. da. **Sistema de tratamento de água subterrânea em áreas rurais para abastecimento humano com filtração lenta não convencional**. 2024. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2023.

SANTOS, A. L. A.; ROSA, T. S.; MICHELAN, D. C. de G. S. Eficiência do tratamento de água por meio dos coagulantes inorgânico sulfato de alumínio e orgânico *Abelmoschus*

esculentus ou quiabo separadamente e associados. **Gaia Scientia**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 84-108, 2022. DOI: 10.22478/ufpb.1981-1268.2022v16n3.63769

SANTOS, A. L. A.; ROSA, T. S.; MICHELAN, D. C. de G. S. Uso do cacto (*Opuntia ficus-indica*) no tratamento de água subterrânea: resultados preliminares. **Anais. XXI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Pernambuco, 2024.

SANTOS, A. L. A.; SANTOS, H. K. S. dos; SIQUEIRA, J. I. P.; LIMA, R. G. S.; MICHELAN, D. C. de G. S.; MENDES, L. A. Análise do desempenho entre coagulantes no tratamento de água: *Abelmoschus esculentus* e sulfato de alumínio. **Anais. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.

SANTOS, D. C. dos; FARIAS, I.; LIRA, M. de A.; SANTOS, M. V. F. dos; ARRUDA, G. P. de; COELHO, R. S. B.; DIAS, F. M.; MELO, J. N. de. **Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em Pernambuco**. Recife: IPA, Documentos, v. 30, 48 p., 2006.

SANTOS, J. A.; GONZAGA, M. I. S.; ALMEIDA, A. Q.; SILVA, A. J.; SANTOS, J. C. de J.; LIMA, I.S. Characterization, water retention and availability of different types of biochar from animal and plant origin. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. e48411528360, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i5.2836

SANTOS, J. R. dos; VIEIRA, M. N. Uso do Mandacaru (*Cereus Jamacaru*) como Coagulante Natural para o Tratamento de Água. **Periódico Tchê Química**, v. 16, n. 31, 2018. DOI: 10.52571/PTQ.v16.n31.2019.33_Periodico31_pgs_27_37.pdf

SANTOS JÚNIOR, J. L. dos; SANTOS, L. A. R. dos; LIMA, A. de J.; MICHELAN, D. C. D. G. S. Tratamento de água por filtração lenta com meio filtrante composto de areia e resíduo sustentável de maravalha. **Anais. XII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe**, 2020.

SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: Análises microbiológicas e físico-químicas em águas subterrâneas. **Revista Contexto e Saúde**, v. 13, n. 24, p. 8, 2013. DOI: 10.21527/2176-7114.2013.24-25.46-53

SANTOS, S. T. dos; LIMA, A. de J.; MICHELAN, D. C. de G. S. Desempenho de filtros lentos com meio filtrante de misturas de areia e materiais sustentáveis. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 139-153, 2023. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.82098

SANTOS, W. N. de A.; MICHELAN, D. C. de G. S.; SANTOS, D. de G.; BATISTA, I. F. Avaliação do uso dos coagulantes sulfato de alumínio e tanino vegetal em parâmetros de tratamento de água para abastecimento humano. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 1, n. 14, p. 23-34, 2020. DOI: 10.22411/rede2020.1401.02

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. Pearson Education do Brasil, 2008.

SILVA, A. A. dos S.; MONTEIRO, K. A.; FERREIRA, J. P. R.; FREITAS, C. P. M. de; RENATO, N. dos S.; MOUNTEER, A. H. Reaproveitamento de biomassa agrícola para síntese

de biocarvão para uso no tratamento terciário de esgoto doméstico. **Anais**. XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2022.

SILVA, A. P. G.; SOUZA, C. C. E. de; RIBEIRO, J. E. S.; SANTOS, M. C. G. DOS, PONTES, A. L. S. de; MADRUGA, M. S. Características físicas, químicas e bromatológicas de palma gigante (*Opuntia ficus-indica*) e miúda (*Nopalea cochenillifera*) oriundas do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 9, n. 2, 2015. DOI:10.3895/rbta.v9n2.1616

SILVA, D. E. da; CORDEIRO, J.; CALAZANS, G. M.; VIEIRA, E. D.; CHAVES, S. L.; PEREIRA, S. Análise da eficiência da filtração lenta para o tratamento de água de uma nascente situada na zona rural de Passabém–MG. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 6, p. e676184, 2018. DOI: 10.17648/rsd-v7i6.235

SILVA, I. C.; MEDEIROS, D. L.; LUCENA, D. V.; ROCHA, C. O. da; GADELHA, A. J. F. Caracterização, tratamento e utilização do carvão ativado para adequação de parâmetros físico-químicos de efluentes oleosos através da adsorção em banho finito. **Revista Principia**, n. 45, p. 171-179, 2019. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n45p171-179

SILVA, L. L. R.; SOUSA, R. A. **Aulas práticas de Química Ambiental: Alguns Experimentos para a Determinação da Qualidade de Águas Superficiais**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.

SILVA, R. de C. A. da; ARAÚJO, T. M. de. Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA). **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 8, p. 1019-1028, 2003. DOI: 10.1590/S1413-81232003000400023

SILVA, R. F. da. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020. DOI: 10.19142/rpq.v14i27.577

SILVA, R. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Palmas forrageiras *Opuntia ficus-indica* e *Nopalea cochenillifera*: sistemas de produção e usos. **Revista Geama**, p. 151-161, 2015.

SINGH, R. P.; KARMAKAR, G. P.; RATH, S. K.; KARMAKAR, N. C.; PANDEY, S. R.; TRIPATHY, T.; PANDA, J.; KANAN, K.; JAIN, S. K.; LAN, N. T. Biodegradable drag reducing agents and flocculants based on polysaccharides: materials and applications. **Polymer Engineering & Science**, v. 40, n. 1, p. 46-60, 2000. DOI: 10.1002/pen.11138

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of Instrumental Analysis**. Cengage Learning; 6 edition, 2019.

SMEWW. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23^a ed. 2017.

SNIS. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto - 2021**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/ab>>. Acesso em 11 de abril de 2024.

SOUZA, D. F. L. de; REIS JUNIOR, J. C. F. dos; RODRIGUES, C. A. N. Tratamento de água para consumo humano, utilizando filtro composto de carvão ativado produzido a partir de

endocarpo de coco, borracha de pneu e caroços de açaí. **Anais. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, 2018.

SOUSA JUNIOR, O. L.; MENDES, C. G. da N.; INÁCIO, A. R. Avaliação do desempenho de manta geotêxtil em reator em batelada sequencial no tratamento de esgoto sanitário. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 02, p. 413-423, 2020. DOI: 10.1590/S1413-41522020187228

SOUZA, J. G.; ALVES, M. R. Caracterização química de biocarvões produzidos a partir de biossólido e bagaço de cana-de-açúcar. **Colloquium Exactarum**, v.14, p. 154-163, 2022.

SOUZA, W. A. de. **Tratamento de Água**. NATAL: CEFET/RN, 2007.

SUASSUNA, P. Tecnologia do cultivo Intensivo da palma – TCIP. IN: NAZARENO, M. A.; OCHOA, M. J.; DUBEUX JUNIOR, J. C. (Ed.). **Actas de la Segunda Reunión para el Aprovechamiento Integral de la Tuna y otras Cactáceas y I Reunión Sudamericana CACTUSNET FAO-ICARDA**. Global: CACTUSNET, 2013.

SCHULTZ, A. M. B.; COLET, C. de F.; CARBONERA, R.; FACHINETTO, J. M. Qualidade da água destinada ao consumo humano frente a caracterização do entorno de poços artesianos localizados em áreas rurais de um município da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. e4575, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i1.4575.

TELES, M. M.; SANTOS, M. V. F. dos.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; LIRA, M. D. A.; FERREIRA, R. L. C.; BEZERRA NETO, E.; FARIAS, I. Efeito da adubação e do uso de nematicida na composição química da palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, p. 1992-1998, 2004. DOI: 10.1590/S1516-35982004000800010

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and applied chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015. DOI: 10.1515/pac-2014-1117

THOMPSON, K. A.; SHIMABUKU, K. K.; KEARNS, J. P.; KNAPPE, D. R.; SUMMERS, R. S.; COOK, S. M. Environmental comparison of biochar and activated carbon for tertiary wastewater treatment. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 20, p. 11253-11262, 2016. DOI: 10.1021/acs.est.6b03239

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de água**. 1º Edição, São Paulo, DHS/POLI – USP. 643p., 2006.

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

VASCONCELOS, M. B. O que são poços? Um panorama das terminologias utilizadas para captações de águas subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 2, p. 44-57, 2017. DOI: 10.14295/ras.v31i2.28666

VASCONCELOS, R. L. F. de M.; ALBUQUERQUE, C. G. de. Abrangência da coleta e tratamento de esgoto na região nordeste do Brasil. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 2, p. 14-20, 2019.

VITT, L. A. M.; ALENCAR, B. R. A.; DUTRA, E. D.; RIES, L. A. da S. Valorização da palma forrageira como matéria-prima para produção de bioenergia em regiões semiáridas. **Anais. 10º Salão Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão da Uergs (SIEPEX)**, v. 1, n. 10, 2021.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 1, 243 p., 1996.

VU, C. T.; WU, T. Enhanced slow sand filtration for the removal of micropollutants from groundwater. **Science of the Total Environment**, v. 809, p. 152161, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152161

WANDERLEY, W. L.; FERREIRA, M. de A.; ANDRADE, D. K. B. de; VÉRAS, A. S. C.; FARIAS, I.; LIMA, L. E. de; DIAS, A. M. de A. Palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill) em substituição à silagem de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) na alimentação de vacas leiteiras. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, p. 273-281, 2002. DOI: 10.1590/S1516-35982002000100030

WERLANG, E. B.; SCHNEIDER, R. de C. D. S.; RODRIGUEZ, A. L.; NIEDERSBERG, C. Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. **Revista Jovens Pesquisadores**, v. 3, n. 1, p. 156-167, 2013. DOI: 10.17058/rjp.v3i1.3600

ZARA, R. F.; THOMAZINI, M. H.; LENZ, G. F. Estudo da eficiência de polímero natural extraído do cacto Mandacaru (*Cereus jamacaru*) como auxiliar nos processos de coagulação e floculação no tratamento de água. **Revista de Estudos Ambientais (Online)**, v.14, n.2, p.75-83, 2012. DOI: 10.7867/1983-1501.2012v14n2p75-83