



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA
BACHARELADO EM QUÍMICA

JAQUELINY BRENDA DE MEDEIROS

USO DA MORINGA OLEIFERA LAM COMO COAGULANTE NATURAL NO
TRATAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

João Pessoa-PB

2023

JAQUELINY BRENDA DE MEDEIROS

**USO DA MORINGA OLEIFERA LAM COMO COAGULANTE NATURAL NO
TRATAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Química da Universidade Federal
da Paraíba (UFPB) para obtenção do grau de
bacharelada em Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cláudia de Oliveira
Cunha

João Pessoa-PB

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M488u Medeiros, Jaqueliney Brenda de.

Uso da moringa oleifera lam como coagulante natural
no tratamento de águas superficiais / Jaqueliney Brenda
de Medeiros. - João Pessoa, 2023.
58 p. : il.

Orientação: Cláudia de Oliveira Cunha.

TCC (Curso de Bacharelado em Química) - UFPB/CCEN.

1. Tratamento de águas. 2. Moringa Oleifera Lam. 3.
Planejamento fatorial. 4. Química. I. Cunha, Cláudia de
Oliveira. II. Título.

UFPB/CCEN

CDU 54(043.2)

JAQUELINY BRENDA DE MEDEIROS

**USO DA MORINGA OLEIFERA LAM COMO COAGULANTE NATURAL NO
TRATAMENTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Química da Universidade Federal
da Paraíba (UFPB) para obtenção do grau de
bacharelada em Química.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cláudia de Oliveira
Cunha

Aprovado em 19 / 05 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Cláudia de Oliveira Cunha (Orientadora)

Universidade Federal da Paraíba

Liliana Lira

Prof.^a Dr.^a Liliana de Fátima Bezerra Lira de Pontes (Examinadora)

Universidade Federal da Paraíba

Kelvin Costa de Araújo

Me. Kelvin Costa de Araújo (Examinador)

Universidade Federal da Paraíba

Dedico este trabalho em memória ao meu avô, José Inocêncio, que, apesar de analfabeto, foi o primeiro a me ensinar sobre tratamento de água. Sua memória inspirou este estudo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita sabedoria e amor incondicional que me sustentaram durante todo a vida.

Aos meus pais, Manoel e Josileide, pelo amor, apoio e incentivo. Foram inúmeras as vezes em que vocês renunciaram a seus próprios interesses para que eu chegasse até aqui.

À minha orientadora Cláudia, que muito me ensinou durante toda a graduação. Sua amizade, carinho e cuidado foram, por diversas vezes, um abraço de mãe. Obrigado pela paciência, dedicação e pelos ensinamentos que foram fundamentais para minha formação.

À minha família LEQA - Kelvin, Isla, Hebert e Katiusca. Vocês foram a melhor turma que eu não tive na graduação. Obrigada pela amizade, carinho, cuidado, sorrisos e acolhimento.

À minha maior fã, vovó Esther sou grata pelo seu amor incondicional.

Ao meu professor de ensino médio Roselino, por me apresentar à química com tanta paixão, despertando meu amor por essa ciência.

Aos meus amigos e familiares, pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e paciência durante os momentos de ausência.

Ao Departamento de Química e seu corpo docente que demonstraram estar comprometidos com a qualidade e excelência do ensino.

À UFPB, CAPES e ao CNPq, pelo incentivo e bolsas concedidas ao longo da minha graduação.

A vida não é fácil para nenhum de nós, mas devemos ter persistência e, acima de tudo, confiança em nós mesmos. Devemos acreditar que somos talentosos em alguma coisa, e que essa coisa, a qualquer custo, deve ser alcançada. (Marie Curie)

RESUMO

A água é um recurso finito e indispensável à vida, que a cada dia vem se tornando menos disponível em sua forma viável de utilização, sendo necessários tratamentos para adequação dos parâmetros de qualidade que não se enquadram nas diretrizes da legislação. Dentre os tratamentos, a clarificação é empregada em amostras que não atendem as especificações de cor e turbidez, sendo utilizado um agente coagulante para reduzir as forças que tendem a manter separadas as partículas em suspensão. Geralmente, o coagulante empregado para essa finalidade é o sulfato de alumínio, devido à sua alta eficiência e baixo custo. Entretanto, a presença contínua de alumínio residual na água tratada ao longo do tempo pode ser um fator que contribui para o desenvolvimento da doença de Alzheimer. Por essa razão, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a eficiência da utilização de sementes de Moringa Oleífera Lam (MO) como agente coagulante no processo de clarificação de água. A água utilizada no estudo foi coletada no Rio Jaguaribe - PB, que possui a característica de elevados teores de cor e turbidez. As sementes, por sua vez, foram colhidas no município de Santa Luzia, situado no sertão paraibano. Ambas as amostras foram acondicionadas sob refrigeração para preservar suas características, sendo as sementes posteriormente trituradas para serem utilizadas em sua forma mássica. O método proposto foi otimizado por meio de um planejamento fatorial 2^3 , utilizando as variáveis tempo de sedimentação, massa e granulometria da MO. A melhor condição de trabalho foi com a utilização de 200 mg/L de moringa, granulometria de 850 μm e tempo de sedimentação de 90 min. Os resultados demonstraram uma eficiência de 87,20% na remoção de turbidez e 100% na remoção de cor, quando avaliada a ação coagulante isolada da moringa. Em relação ao processo completo, que inclui a agitação, sedimentação e filtração, a eficiência foi de 99,50% para a remoção de turbidez e 100% para a remoção de cor. O ensaio com as melhores condições de trabalho foi caracterizado conforme os parâmetros de pH, OD, DBO e DQO e comparado com a amostra antes do tratamento. Conclui-se que a utilização da moringa como agente coagulante no tratamento de águas superficiais é eficiente para remoção de cor e turbidez, e pode ser uma alternativa para a substituição do sulfato de alumínio.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de águas. Moringa Oleífera Lam. Planejamento Fatorial.

ABSTRACT

Water is a finite and indispensable resource for life, which is becoming less available in its viable form for use every day. Treatments are necessary to adjust the quality parameters that do not comply with legislation guidelines. Among these treatments, clarification is employed for samples that do not meet color and turbidity specifications, using a coagulating agent to reduce the forces that keep suspended particles separated. Generally, aluminum sulfate is used as the coagulant for this purpose due to its high efficiency and low cost. However, the continuous presence of residual aluminum in treated water over time can be a contributing factor to the development of Alzheimer's disease. For this reason, this research aims to evaluate the efficiency of using *Moringa Oleifera* Lam (MO) seeds as a coagulating agent in the water clarification process. The water used in the study was collected from the Jaguaribe River in PB, which is characterized by high levels of color and turbidity. The seeds, in turn, were harvested in the municipality of Santa Luzia, located in the hinterlands of Paraíba. Both samples were refrigerated to preserve their characteristics, and the seeds were subsequently ground to be used in their mass form. The proposed method was optimized through a 2^3 factorial design, considering the variables of sedimentation time, mass, and granulometry of MO. The best working condition was found to be the use of 200 mg/L of Moringa, a granulometry of 850 μm , and a sedimentation time of 90 min. The results demonstrated an efficiency of 87.20% in turbidity removal and 100% in color removal when evaluating the isolated coagulating action of Moringa. Regarding the complete process, which includes agitation, sedimentation, and filtration, the efficiency was 99.50% for turbidity removal and 100% for color removal. The assay under the best working conditions was characterized according to the parameters of pH, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD), and chemical oxygen demand (COD), and compared with the sample before treatment. It is concluded that the use of Moringa as a coagulating agent in the treatment of surface water is efficient for color and turbidity removal and can be an alternative to replace aluminum sulfate.

KEYWORDS: Water treatment. *Moringa Oleifera* Lam. Factorial planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Rio São Francisco	15
Figura 02 - Sistema de abastecimento e tratamento de água	17
Figura 03 - Agregação de partículas coloidais com carga negativas e reestabilização de coloide com carga positiva	24
Figura 04 - Crescimento, quebra e reestruturação dos flocos durante a floculação...	25
Figura 05 - Estrutura da Moringa Oleífera Lam	30
Figura 06 - Ponto de coleta no Rio Jaguaribe	36
Figura 07 - Moringa Oleífera Lam. a. Árvore; b. Fruto (Vargem); c. Semente	37
Figura 08 - Esquema do método de clarificação de águas superficiais utilizando M. Oleífera como coagulante	39
Figura 09 - Estudo da remoção de cor e turbidez pela variação na massa de moringa	43
Figura 10 - Gráfico de Pareto do planejamento fatorial 2^3 para remoção de turbidez	45
Figura 11 - Superfícies de respostas do planejamento fatorial 2^3 em função da porcentagem de remoção de turbidez [a] Granulometria e Massa; TS nível inferior (-1) [b] Granulometria e Massa; TS nível superior (+1).....	46
Figura 12 - Gráfico de Pareto do planejamento fatorial 2^3 para remoção de cor	48
Figura 13 - Superfície de resposta do planejamento fatorial 2^3 em função da remoção de cor	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Padrão organoléptico de potabilidade.....	19
Tabela 02 - Métodos de medição da turbidez	21
Tabela 03 - Crescimento, quebra e reestruturação dos flocos durante a floculação.....	26
Tabela 04 - Principais utilidades da Moringa Oleífera Lam	30
Tabela 05 - Composição química da semente de Moringa oleífera Lam	31
Tabela 06 - Fundamentos do planejamento fatorial	34
Tabela 07 - Níveis e fatores usados no planejamento fatorial 2 ³ para avaliar a utilização da M. Oleífera como coagulante no tratamento de águas superficiais.....	40
Tabela 08 - Matriz do planejamento fatorial 2 ³	41
Tabela 09 - Estudo de remoção de cor e turbidez com diferentes concentrações de moringa em granulometria aleatória.....	42
Tabela 10 - Resultado do Planejamento Fatorial 2 ³	45
Tabela 11 - Caracterização da amostra de estudo (Rio Jaguaribe)	50
Tabela 12 -Avaliação do método otimizado utilizando diferentes concentrações de moringa em função da eficiência da remoção de cor e turbidez	52
Tabela 13 - Comparação dos resultados de estudos que utilizaram de diferentes concentrações de moringa para remoção de turbidez	53

LISTA DE SIGLAS, E ABREVIATURAS

CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
LEQA	Laboratório de Estudos em Química Ambiental
MOO	Moringa Oleífera Lam
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OD	Oxigênio Dissolvido
PCU	Unidade de Cobalto de Platina
TBD	Turbidez
TML	Tempo de Mistura Lenta
TMR	Tempo de Mistura Rápida
TS	Tempo de Segmentação
uH	Unidade de Hazen
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Águas superficiais	15
2.2 Tratamento de água para abastecimento público	16
2.3 Parâmetros Físico-Químicos	19
2.3.1 Turbidez	20
2.3.2 Cor.....	22
2.4 Processo de Coagulação e Floculação	23
2.5 Coagulantes para o tratamento de água	26
2.5.1 Sulfato de Alumínio	27
2.5.2 Coagulantes Naturais	28
2.6 Moringa Oleífera Lam.....	29
2.7 Planejamento Fatorial	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 Amostragem.....	35
3.2 Método.....	37
3.3 Otimização do Método	39
3.4 Análises.....	41
4 RESULTADOS	42
4.1 Otimização da concentração de Moringa	42
4.2 Planejamento Fatorial 2 ³	44
4.3 Caracterização da Amostra	50
4.4 Considerações sobre o Método	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital e limitado, fundamental para a existência da vida e a cada dia vem se tornando menos disponível em sua forma viável de utilização, tendo em vista que muitas das suas aplicações exigem um padrão mínimo de qualidade que deve ser realizado por meio de avaliações químicas, físicas e biológicas [1]. Para determinar o padrão de qualidade da água recomendado para cada atividade, existem algumas normativas, como exemplo, a Portaria do Ministério da Saúde nº 888, de 4 de maio de 2021, que dispõe sobre o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade [2]. Assim, após verificadas as especificações de qualidade, as águas que não se enquadram são submetidas a tratamentos para que se adequem aos requisitos exigidos para determinada finalidade.

Dentre os critérios analisados para estabelecer a potabilidade da água, estão os parâmetros de cor e turbidez, que correspondem à medida da resistência da água a passagem de luz, em que esta resistência é provocada pela presença de partículas dissolvidas [3]. Estes são parâmetros de aspecto estético de aceitação ou rejeição do produto e, quando não conformes, são comumente submetidos ao tratamento de clarificação, processo de purificação da água que consiste nas etapas de coagulação, floculação e sedimentação [4].

Coagulação é o processo pelo qual o agente coagulante é adicionado à água, reduzindo as forças repulsivas que tendem a manter separadas as partículas em suspensão. Já a floculação é a aglomeração das partículas em suspensão em função das forças de *Van Der Waals*, que é um processo que se dá por meio de transporte fluído, de modo a formar partículas maiores que possam sedimentar [5]. A sedimentação, por sua vez, constitui a última etapa da clarificação – nesse ponto do processo, a água, anteriormente floculada, é separada dos sólidos através da decantação pela força da gravidade [4].

O sulfato de alumínio destaca-se como o coagulante químico mais utilizado no Brasil, no processo de clarificação das águas, devido a sua boa eficiência e pelo baixo custo [6]. Porém, como o alumínio não é biodegradável, elevadas

concentrações desse composto podem ocasionar problemas à saúde humana, inclusive o aceleração do processo degenerativo do *Alzheimer* [7].

Devido aos danos causados pela utilização dos coagulantes químicos, o emprego de coagulantes naturais tem se mostrado vantajoso, especificamente em relação à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodos residuais [8]. Em vários países asiáticos, africanos e sul-americanos, inúmeras plantas estão sendo utilizadas como coagulantes naturais. Em geral, os estudos são aplicados ao tratamento de águas para fins potáveis.

A *Moringa Oleífera* Lam (MO) é uma planta de espécie perene, da família *Moringaceae*, com boa adaptação em uma ampla faixa de solos [9]. A semente dessa planta tem se mostrado eficiente como coagulante natural. A função coagulante da moringa se deve à presença de uma proteína catiônica de alto peso molecular, que desestabiliza as partículas contidas na água e coagula os colóides [10]. Essa proteína corresponde a maior fração da semente, em torno de 40% [7].

Segundo Baptista [11], as sementes são uma alternativa viável de agente coagulante em substituição aos sais de alumínio, visto que, quando comparada com o alumínio, as sementes de MO são biodegradáveis, não causam danos à saúde, produzem menor volume de lodo ao final do tratamento, e não alteraram significativamente o pH e a alcalinidade da água, evitando problemas de corrosão e custos adicionais ao processo.

Vários fatores podem influenciar na eficiência do processo [12]. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do coagulante natural *Moringa Oleífera* Lam na clarificação de águas superficiais, a partir dos seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a eficiência do processo de remoção de cor e turbidez em água superficial utilizando *Moringa Oleífera* Lam;
- Otimizar os experimentos a partir de planejamentos fatoriais de acordo com a massa da moringa, granulometria da moringa, e tempo de sedimentação;
- Comparar o impacto do tratamento nos parâmetros de DBO, DQO, OD e pH.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Águas superficiais

O consumo de água, embora indispensável à saúde, nem sempre é de fácil acesso. A escassez, a falta de recursos (muitas das vezes, hídricos e financeiros) e/ou, ainda, a ausência de políticas públicas direcionadas são alguns dos motivos que dificultam sua disponibilidade. Nessa perspectiva, a sua extração pode acontecer, pelo menos, de duas maneiras, pela superfície e pelo subsolo [13].

Conhecidas por se acumularem no solo, as águas superficiais são as responsáveis pela formação de rios e lagos [13]. A Figura 01 apresenta um exemplo de água superficial, o rio São Francisco, um dos mais importantes da América do Sul, estando localizado no Brasil, entre os estados de Minas Gerais, Bahia, Sergipe e Alagoas [14].

Figura 01 - Rio São Francisco



Fonte: Agência Brasil (2021).

Por ser um tipo de água que pode possuir sólidos suspensos e coloidais, além de compostos orgânicos, o uso bruto das águas superficiais pode causar diversos problemas à saúde. Desse modo, é preciso tratá-la com vistas a diminuir

não só a cor, a turbidez e os patógenos, mas também a matéria orgânica natural, que, ao reagir com o cloro, gera subprodutos que, mais uma vez, podem afetar a saúde [13]. Para tanto, algumas medidas podem ser realizadas a fim de remover ou reduzir tais substâncias.

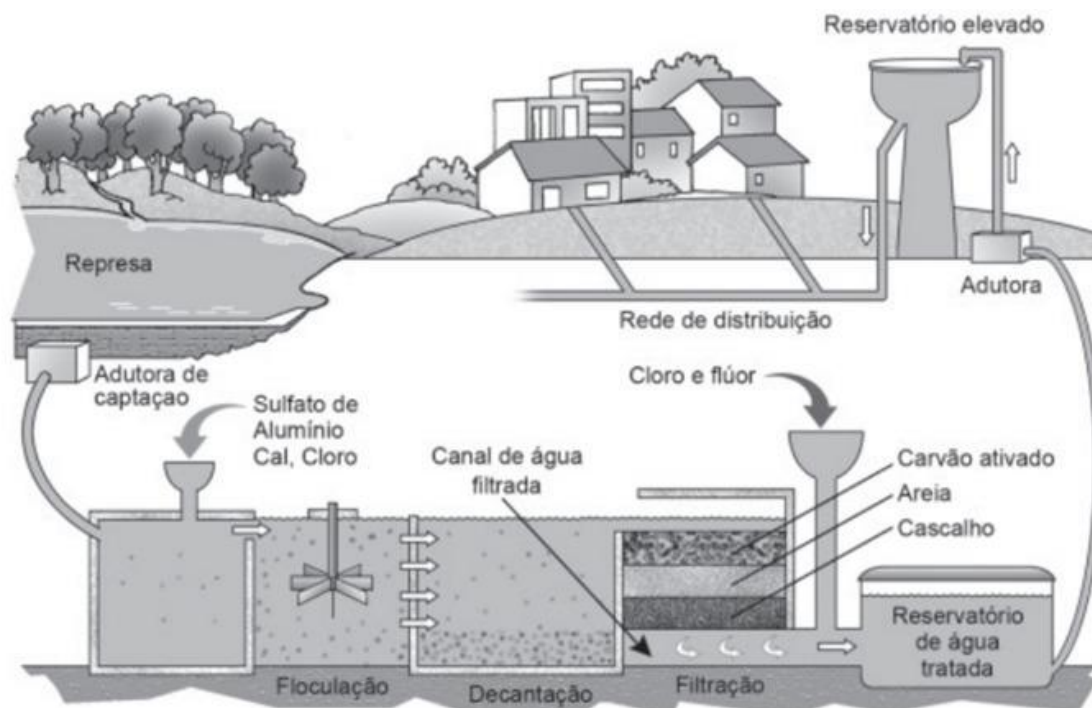
As águas subterrâneas por sua vez são aquelas que se encontram abaixo da superfície do solo, preenchendo completamente os poros das rochas e dos sedimentos, constituindo os chamados aquíferos [15]. Devido a difícil extração das águas subterrâneas torna-se cada vez mais importante considerar a água superficial como um recurso valioso a ser utilizado de forma sustentável. Para garantir a disponibilidade desse recurso, é fundamental implementar medidas para combater a sedimentação de rios e lagos, e adotar práticas de tratamento adequado. Essas soluções são as mais eficientes para expandir a oferta de água e assegurar o acesso a este recurso essencial.

2.2 Tratamento de água para abastecimento público

O tratamento de água consiste em um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos para remoção de impurezas e contaminantes que são atribuídos a água pelas partículas suspensas, coloidais, microrganismos, matéria orgânica e outras substâncias que podem afetar a saúde humana [16]. O tratamento é aplicado em três categorias principais, purificação para uso doméstico, tratamento para aplicações industriais específicas, e tratamento de águas residuárias a fim de ajustá-las aos padrões de despejo no corpo receptor ou reutilização [17].

A Figura 02 ilustra o sistema de purificação de água para uso doméstico, que comumente se dá nas Estações de Tratamento de Água (ETA). As ETA são unidades de processamento projetadas para adequar a água bruta aos padrões de potabilidade prescritos pela legislação [16]. No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888 de 4 de maio de 2021, é a responsável por estabelecer o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Figura 02 – Sistema de abastecimento e tratamento de água



Fonte: Nowacki *et al.* (2014, p. 43).

O processo começa pela captação de água nos mananciais (fontes de obtenção de água para consumo humano), podendo ser de origem superficial como rios, lagos, nascentes, represas, córregos ou de origem subterrânea, como poços artesianos e freáticos. Nessa etapa deve ser considerada a qualidade e a quantidade da água nas diferentes estações do ano. Em seguida a adutora (sistema formado pela tubulação de transporte) é responsável por levar a água captada para a ETA. Esse sistema também é responsável pela distribuição da água tratada para o abastecimento público [17].

Ao chegar na ETA a água passa por um sistema de gradeamento para remover resíduos sólidos maiores, como galhos, folhas e lixo. Na etapa de pré-tratamento é realizada a adição de substâncias químicas, como: a cal (CaO), para correção do pH, tornando a água mais alcalina e evitando corrosão das tubulações; cloro para iniciar o processo de desinfecção, eliminando os microrganismos patogênicos; e um agente coagulante como sulfato de alumínio, que provoca a coagulação química da água, processo que auxilia na remoção de partículas

suspensas ou dissolvidas, que estão frequentemente associadas à cor e turbidez [17].

Na coagulação o agente químico cria íons carregados positivamente na água, que contém coloides carregados negativamente, o resultado é a redução das forças repulsivas entre as partículas, facilitando a formação de flocos [18].

Após a desestabilização das partículas, é necessário provocar colisões entre partículas através de agitação, para induzir a agregação e crescimento de flocos em maior volume e densidade. No entanto, para que o processo de floculação seja eficiente a agitação do meio deve ser suave o suficiente para aproximar as partículas dos flocos sem que eles sejam rompidos. Fatores como pH, temperatura e concentração de agentes coagulantes também devem ser monitorados para evitar problemas na formação dos flocos, tendo em vista que o tamanho e a estabilidade deles facilitarão a próxima etapa do tratamento [19].

A água floculada é direcionada aos decantadores, onde flui lentamente por tanques até a saída. Durante esse percurso, as partículas mais densas do que a água se sedimentam devido à ação da gravidade, permitindo a separação dos flocos da água em tratamento. Normalmente, a água permanece nesse processo por três horas, conhecido como tempo de detenção. As partículas menores ou com densidade próxima à da água persistem e são removidas na etapa de filtração [18].

O processo de filtração ocorre pela passagem da água por filtros que contém camadas de areia fina, areia grossa, pedrisco e pedregulho. A água atravessa o filtro da camada mais fina (areia fina) até a mais grossa (pedregulho) para reter aqueles flocos que passaram pela decantação. E, em seguida, cai em um tanque de contato para receber a segunda dosagem de cloro e cal para garantir que a água seja destinada totalmente desinfetada e sem danificar a rede de distribuição por corrosão. Em algumas ETA também é adicionado o flúor para prevenção de caries na população. Finalmente, o líquido é destinado para o tanque de armazenamento para posterior consumo [17].

2.3 Parâmetros físico-químicos

A legislação utiliza parâmetros para caracterizar as águas e estabelece faixas de valores máximos permitidos (VMP) para definir sua qualidade e finalidade. Esses parâmetros englobam aspectos físicos, como temperatura, cor e turbidez; aspectos químicos, como pH, condutividade elétrica, nitratos, dureza total e cloretos; aspectos biológicos, como coliformes termotolerantes e totais; e aspectos sensoriais, como sabor e odor. Com base nessa avaliação, as águas são classificadas para diferentes finalidades, como abastecimento, recreação, navegação, pesca, irrigação, dessedentação de animais, entre outras [20].

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, desempenha um papel importante na classificação dos corpos de água e estabelecimento de diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Além disso, essa resolução estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, garantindo a proteção dos recursos hídricos e o cumprimento das normas ambientais necessárias.

Para água de abastecimento a Portaria GM/MS nº 888 de 4 de maio de 2021, determina a análise os seguintes parâmetros organolépticos e respectivos valores máximos permitidos (Tabela 01).

Tabela 01 - Padrão organoléptico de potabilidade.

Parâmetro	CAS	Unidade	VMP ⁽¹⁾
Alumínio	7429-90-5	mg/L	0,2
Amônia (como N)	7664-41-7	mg/L	1,2
Cloreto	16887-00-6	mg/L	250
Cor Aparente ⁽²⁾		uH	15
1,2 diclorobenzeno	95-50-1	mg/L	0,001
1,4 diclorobenzeno	106-46-7	mg/L	0,0003
Dureza total		mg/L	300
Ferro	7439-89-6	mg/L	0,3
Gosto e odor		Intensidade	6
Manganês	7439-96-5	mg/L	0,1
Monoclorobenzeno	108-90-7	mg/L	0,02
Sódio	7440-23-5	mg/L	200
Sólidos dissolvidos totais		mg/L	500
Sulfato	14808-79-8	mg/L	250
Sulfeto de hidrogênio	7783-06-4	mg/L	0,05
Turbidez ⁽³⁾		uT	5
Zinco	7440-66-6	mg/L	5

NOTAS: ¹ Valor máximo permitido; ² Unidade Hazen (mgPt-Co/L); ³ Unidade de turbidez. Fonte: Brasil (2021).

Dentre os parâmetros previstos na legislação para o controle de qualidade da água potável, cor e turbidez correspondem a parâmetros de aspecto estético que definem a aceitação ou rejeição do produto. Quando esses parâmetros não estão dentro dos limites estabelecidos, a água é submetida ao tratamento de clarificação [20].

2.3.1 Turbidez

A turbidez é um importante parâmetro para avaliação da qualidade da água, é de fácil percepção e através dela podemos obter informações importantes acerca do estado higiênico e sanitário da água, indicando riscos biológicos e/ou químicos para consumo.

A turbidez é uma característica física da água que corresponde ao seu grau de resistência à passagem de luz. É resultante da presença de partículas grosseiras e coloidais em suspensão, de origem natural devido a erosão e aos materiais orgânicos e inorgânicos provenientes de efluentes. Essas suspensões provocam a dispersão e a absorção da luz, conferindo à água uma aparência indesejável. Além do aspecto visual, a turvação das águas causam a diminuição da capacidade de fotossíntese, aumenta a toxicidade, diminui a temperatura do meio e, quando muito elevada, pode impactar na biota aquática, tendo em vista que alguns animais do meio podem encontrar dificuldade na caça de alimentos devido à baixa visibilidade. Além disso, a remoção de turbidez se faz necessária para o aumento da eficiência no processo de desinfecção da água, principalmente na inativação de vírus, já que ela é maior quanto menor for a turbidez [21]. Para fins de potabilidade, a legislação estabelece a condição de 5,0 NTU para turbidez [20].

Existem diferentes métodos disponíveis para avaliar a turbidez (conforme apresentado na Tabela 02), sendo a Nefelometria e a Turbidimetria os mais destacados devido às suas vantagens, como baixo custo e facilidade de manuseio. Como resultado, eles são amplamente utilizados em estudos científicos e no monitoramento de Estações de Tratamento de Água. A unidade de medida

comumente utilizada para quantificar os valores de turbidez é a NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez).

Tabela 02 – Métodos de medição da turbidez

Método	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Diafanômetro	Equipamento histórico, um tubo de metal com um fundo de vidro que refletia a luz. A água é colocada dentro do tubo até que o fundo não esteja mais refletindo.	▪ Equipamento portátil; ▪ Fácil manuseio e entendimento;	▪ Não consegue medir valores baixos de turbidez.
Turbidímetro de vela de Jackson	Uma vela é colocada próxima ao fundo do tubo para padronizar a fonte de luz. A água era vertida até que a luz da vela não pudesse ser mais vista.	▪ Fácil manuseio e entendimento; ▪ Possui fonte de luz.	▪ Não consegue medir valores baixos de turbidez. ▪ Tem unidade de turbidez própria (JTU).
Turbidímetro de Parr	Desenvolvimento posterior ao Turbidímetro de vela de Jackson, em que a vela é substituída por uma luz elétrica.	▪ Fácil manuseio; ▪ Possui fonte de luz.	▪ Não consegue medir valores baixos de turbidez.
Disco negro	Um alvo preto é visto horizontalmente debaixo d'água usando um periscópio. Requer duas pessoas: uma segurando o alvo preto e a outra se afastando com o periscópio até não conseguir enxergar mais o alvo.	▪ Faz a medida na horizontal; ▪ Pode ser usado em pequenos riachos.	▪ É difícil posicionar o alvo, pois pode constar em plantas e suspender partículas sedimentais.
Disco de Secchi	É um disco preto e branco (padrão de Secchi) colocado na água e ele é afundado e então é medida a profundidade em que o disco desaparece de vista.	▪ Baixo custo; ▪ Fácil manuseio; ▪ Pode ser usado em lagos e rios sem correnteza.	▪ Não pode ser usado em rios com muita correnteza e em pequenos riachos.
Nefelômetro eletrônico	Junção do Turbidímetro de vela de Jackson e do	▪ Baixo custo; ▪ Fácil manuseio;	▪ Não consegue medir valores de turbidez

	disco de Secchi. No fundo do tubo possui o padrão de Secchi, e a água é vertida até que o padrão não possa ser mais visto, e então a altura da coluna d'água é medida.	▪ Portátil; ▪ Pode ser usado em qualquer corpo d'água.	muito baixos.
--	--	---	---------------

Fonte: Falcade *et al.* (2017).

Dessa forma, fica claro o quão importante é realizar o monitoramento desse parâmetro para diagnosticar a qualidade da água para consumo. É fundamental investir em métodos sustentáveis para a sua remoção, a fim de obter inúmeros benefícios. Além disso, tanto os meios de remoção da turbidez quanto o seu monitoramento apresentam como vantagem um processo fácil e de baixo custo.

2.3.2 Cor

A cor da água corresponde a reflexão da luz em partículas, ou seja, a medida de cor é o grau de redução da intensidade que a luz sofre ao atravessar a água, em consequência da presença de sólidos orgânicos e inorgânicos dissolvidos. Os principais sólidos orgânicos são ácidos húmico e fúlvico, presentes em esgotos domésticos, e taninos, lignina e celulose de resíduos industriais. Óxidos de ferro e de manganês são compostos inorgânicos que podem alterar a coloração das águas e são facilmente encontrados em diversos tipos de solos e rochas [17].

Os principais métodos para determinar a cor são por comparação com padrões de cor, disco de cor, ou por espectrofotometria em amostras com concentrações altas de efluentes industriais. Os resultados da avaliação de cor são expressos em unidades de cor (uH), chamadas de unidade Hazen ou em PCU – Unidades de Cobalto de Platina [23].

A intensidade de cor na água natural varia geralmente entre 0 e 200 uH. Os rios são classificados em dois tipos de água conforme a cor, água branca e preta. As águas brancas possuem alta turbidez, são ricas em nutrientes, têm pH básico, contêm íons dissolvidos e sedimentos em alta concentração. Por outro lado, as

águas pretas apresentam elevada presença de substâncias orgânicas dissolvidas (o que confere uma coloração mais escura), pH ácido, baixa carga de sedimentos e baixa concentração de cálcio e magnésio [23].

O estudo da cor é importante no controle de qualidade das águas, pois, além de se tratar de um aspecto repulsivo e definir restrições para o seu uso, é considerado um critério de potabilidade e um parâmetro operacional para determinação das dosagens de produtos químicos a serem adicionados nos tratamentos. [23]. A Portaria GM/MS nº 888 de 4 de maio de 2021 determina o VMP de 15 uH para água potável.

2.4 Processo de Coagulação e Floculação

No ambiente aquático, a agregação e precipitação de partículas em suspensão coloidal são processos fundamentais, podendo ser divididos em duas classes: coagulação e floculação. Em partículas coloidais a repulsão eletrostática das duas camadas, a camada do íon absorvido e a camada do contraíon impedem que elas se agreguem. O processo de coagulação consiste em reduzir essa repulsão eletrostática das duplas camadas, através da adição de pequenas quantidades de sais que contribuam com íons em solução, para promover a coagulação de coloides hidrofóbicos, permitindo que partículas coloidais de materiais idênticos se agreguem [24].

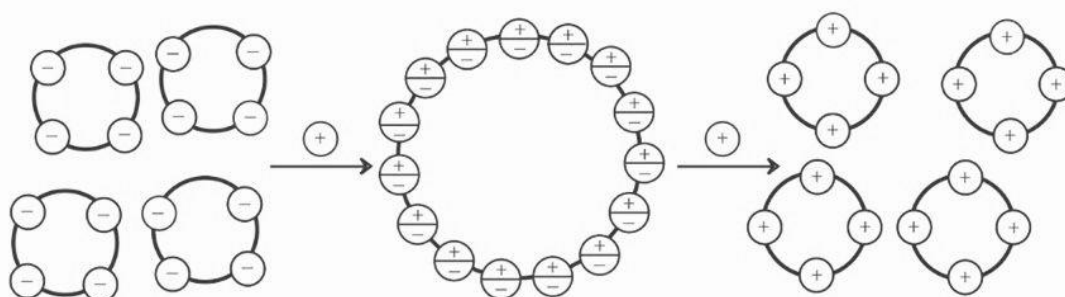
A desestabilização das partículas pode ocorrer por diferentes mecanismos, são eles: compressão da dupla camada elétrica, adsorção e neutralização de carga, varredura, adsorção e formação de pontes. Embora os mecanismos sejam discutidos separadamente, a desestabilização das partículas geralmente ocorre com mais de um mecanismo simultâneo [25].

Adsorção e neutralização de carga: dependendo do pH do meio ocorre a formação de espécies hidrolisadas de carga positiva que podem ser adsorvidas na superfície das partículas, fazendo com que elas desestabilizem. Caso a superfície da partícula não tenha carga a dupla camada elétrica não existirá,

portanto, as forças de van der Waals podem causar a junção das partículas [25].

Podemos observar na Figura 03 o processo em que íons positivos se ligam à superfície de um coloide que inicialmente estava carregado negativamente, levando à precipitação do coloide e, conseqüentemente, à sua reestabilização.

Figura 03 - Agregação de partículas coloidais com carga negativas e reestabilização de coloide com carga positiva



Fonte: Manahan (2013, p.133).

Esse comportamento é explicado pela neutralização inicial da carga superficial negativa das partículas, promovida pela sorção de íons positivos, o que permite a coagulação. À medida que são adicionados íons com carga positiva, a sorção destes promove a formação de partículas coloidais positivas [24].

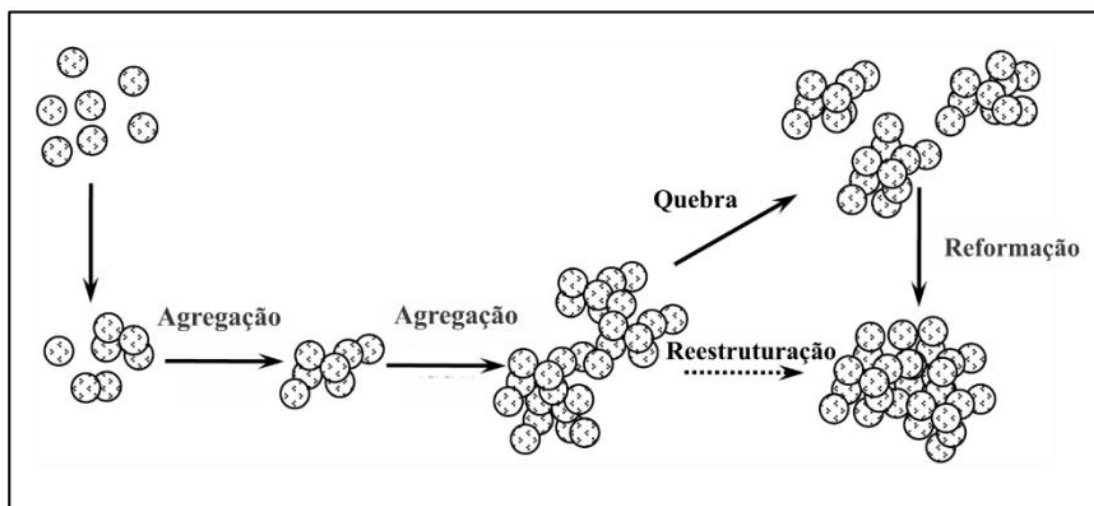
O processo de coagulação é de grande importância no tratamento de água, tendo em vista, que as impurezas presentes na água não se aproximam uma das outras por terem características idênticas, desse modo, a desestabilização das partículas ao ponto de reduzir a repulsão eletrostática promove a agregação das partículas, conferindo-lhes maior volume e densidade, possibilitando sua remoção através da precipitação [26].

A técnica de floculação é responsável por estabelecer ligações químicas entre partículas, levando à aglomeração destas em estruturas maiores conhecidas como malhas de flocos. [23]. Existem três mecanismos que são responsáveis pela floculação: floculação pericinética, floculação ortocinética e floculação por sedimentação diferencial. A floculação pericinética age em escala microscópica, permitindo a agregação das partículas através de colisões causadas pelo

movimento browniano. Já a floculação ortocinética, age em escala macroscópica, e depende da aplicação de um gradiente de velocidade que induz a colisão das partículas. Por fim, a floculação por sedimentação diferencial ocorre quando as partículas se chocam e se agregam durante a sedimentação [25].

Para que a floculação ortocinética ocorra, é necessário um processo de mistura lenta, no qual o meio é agitado de forma controlada para possibilitar o encontro das partículas desestabilizadas e a consequente formação de agregados maiores. Esse processo é realizado em tanques de floculação e é importante que o grau de agitação seja reduzido suficientemente para possibilitar o encontro das partículas, mas não tão baixo para que as partículas não consigam se encontrar e se agregarem [27]. A Figura 04 ilustra como se dá o processo de formação dos flocos.

Figura 04 - Crescimento, quebra e reestruturação dos flocos durante a floculação



Fonte: Spieer, Keller e Pratsinis (1996) apud Ribeiro (2021, p.31).

O desenvolvimento da estrutura e do tamanho do floco é determinado pelo processo de agregação, quebra e reestruturação. No início, as partículas desestabilizadas se juntam para formar pequenos aglomerados que crescem em tamanho e ramificação, porém são suscetíveis à ruptura sob o gradiente de velocidade aplicado. Posteriormente, esses flocos rompidos são reestruturados, com

o tempo, a repetição do processo de ruptura e reformação leva à formação de flocos mais fortes e compactos [25].

É válido dizer que o processo de floculação depende das características da água bruta, pois, quanto maior a quantidade de impurezas, maior é a sua capacidade de formação de flocos e consequentemente maior a decantação [26].

2.5 Coagulantes para o tratamento de água

Os coagulantes são substâncias químicas, orgânicas ou inorgânicas, capazes de descarregar as partículas coloidais. Nessa perspectiva, coagulantes são utilizados com a finalidade de tratar a água e torná-la potável ou apropriada para consumo. No Brasil, os coagulantes mais usados são o sulfato de alumínio, ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e o cloreto férrico (FeCl_3) [28]. A Tabela 03 apresenta as características usuais empregadas para esses coagulantes.

Tabela 03 - Crescimento, quebra e reestruturação dos flocos durante a floculação

Nome comercial	Composição típica	Dosagens usuais aplicadas em estações de tratamento (mg/L)	Massa específica (kg/m ³)	Disponibilidade
Sulfato de Alumínio	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	10 a 60	600 a 1400	Sólido ou Líquido
Cloreto Férrico	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5 a 40	1425	Sólido ou Líquido

Fonte: Elaborado pela autora com base em Araújo (2021).

Constantemente há discussões acerca dos possíveis impactos ambientais causados pelo uso de coagulantes inorgânicos à base de alumínio e ferro, já que o lodo gerado durante o processo de coagulação e floculação contém hidróxidos metálicos que não são biodegradáveis e apresentam potencial ecotoxicológico, requerendo tratamento e disposição adequados [28].

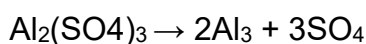
Segundo Driscoll e Letterman (1988) apud Araújo (2021), aproximadamente 11% de todo alumínio presente nas águas ou adicionado na forma de coagulante permanece no lodo após o tratamento das águas. Esta quantidade de alumínio pode ser prejudicial à saúde humana, em especial ao sistema nervoso, como no caso da doença de *Alzheimer* [29].

2.5.1 Sulfato de Alumínio

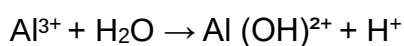
O Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) é uma substância cristalina branca, solúvel em água e que contém íons de alumínio e sulfato. Durante muito tempo ele vem sendo o coagulante químico mais utilizado no tratamento de águas em todo o mundo, isto porque apresenta alta eficiência, fácil manuseio, baixo custo, facilidade de transporte e é produzido em diversas regiões [28].

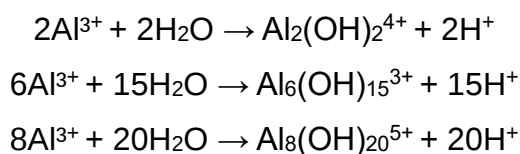
Na aplicação como coagulante, o sulfato de alumínio é adicionado à água ou efluente a ser tratado, onde reage com as partículas em suspensão e substâncias dissolvidas, formando flocos que podem ser facilmente removidos por sedimentação ou filtração. Como floculante, ele ajuda a juntar as partículas formando flocos maiores, o que facilita o processo de remoção [28].

A discussão de Araújo (2021) aborda que ao entrar em contato com a água, o Sulfato de Alumínio se dissocia imediatamente em dois mols de Al^{3+} e três mols de SO_4^{2-} . Durante a hidrólise, íons H^+ são gerados, tornando a solução ácida e aumentando a eficiência do sistema. A reação resultante é:



Na presença desses íons em uma solução aquosa, o alumínio pode reagir com a água de diferentes maneiras, formando várias bases. De acordo com Pavanelli (2001), os mecanismos de formação dessas bases, considerando a uma temperatura de 25°C são:





Conforme observado, a eficiência do sistema é otimizada quando o pH do meio se torna mais alcalino. Assim, o Sulfato de Alumínio é mais eficaz quando utilizado em um intervalo de pH entre 5,5 e 8,5. Quando o pH fica abaixo de 5,5 ou acima de 8,5, os íons de alumínio se tornam solúveis em água e não conseguem precipitar, o que torna a coagulação ineficaz [30].

Embora seja um coagulante eficiente e com baixo custo, o uso do sulfato de alumínio no tratamento de água tem sido alvo de críticas, como já mencionado anteriormente. Devido a essa problemática, pesquisas estão sendo realizadas para desenvolver e utilizar diferentes coagulantes na água como substitutos, ou para recuperar o sulfato de alumínio do lodo gerado nos sedimentadores e reutilizá-lo [29].

2.5.2 Coagulantes Naturais

Os coagulantes naturais são substâncias derivadas de fontes naturais, como plantas e sementes, que possuem propriedades coagulantes [30].

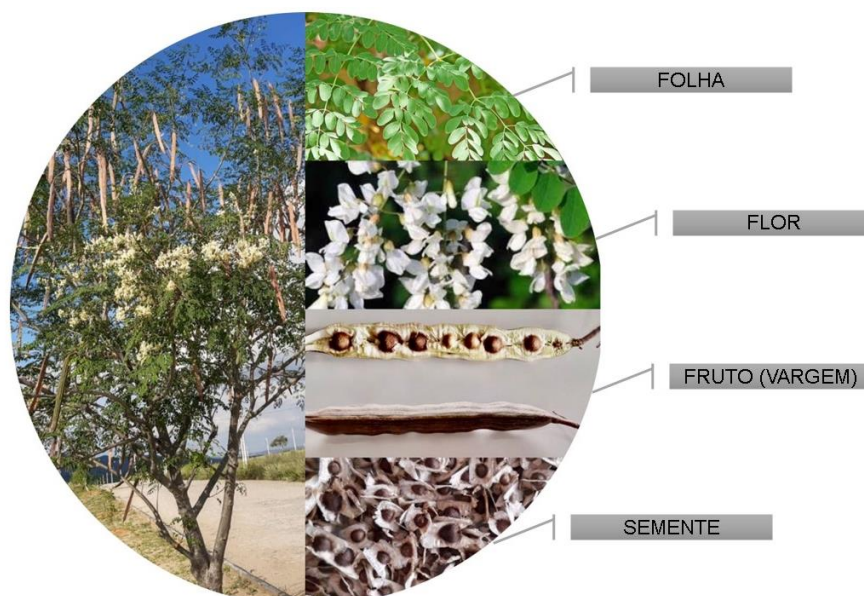
Polieletrólitos são coagulantes de origem orgânico-natural que consistem em compostos com grandes cadeias moleculares contendo sítios com cargas positivas ou negativas. Esses polímeros têm sido utilizados como auxiliares de coagulação e floculação para melhorar a velocidade de sedimentação dos flocos e sua resistência às forças de cisalhamento durante o transporte de água após a floculação. No entanto, a presença de um polieletrólito orgânico, seja natural ou sintético, pode estimular o crescimento de matéria orgânica ou inorgânica, o que pode agravar a formação de substâncias com sabor e odor desagradáveis. Portanto, se a matéria orgânica não for removida nas etapas de coagulação e floculação, é necessário o uso de carvão ativado ou desinfecção com cloro para evitar problemas de qualidade da água [31].

Entre os coagulantes naturais mais comuns estão as sementes de moringa, quitosana e taninos. Essas substâncias contêm compostos orgânicos capazes de agir como coagulantes e floculantes, formando agregados que facilitam a remoção de partículas suspensas na água [29].

A utilização de coagulantes naturais pode ser vantajosa, pois além de apresentarem menor impacto ambiental, possuem baixo custo e são facilmente encontrados em regiões onde as plantas são nativas. No entanto, é importante ressaltar que é necessário estudar a eficiência desses coagulantes em diferentes condições de água, pois pode haver variações em sua eficácia. Além disso, é importante que a utilização de coagulantes naturais seja feita de forma responsável e sustentável, evitando a sobrecarga na colheita das plantas e preservando os ecossistemas locais [30].

2.6 Moringa Oleífera Lam

A *Moringa oleífera* é uma planta que pertence à família *Moringaceae*, a qual é composta por um único gênero e 14 espécies. Originária do norte da Índia, ela é encontrada em regiões subtropicais e é capaz de se adaptar a uma ampla variedade de solos, inclusive solos secos. A espécie cresce rapidamente e pode chegar a quase 10 metros de altura [32]. As partes estruturais da *Moringa oleífera* Lam são: folhas, flores, frutos e sementes (Figura 05).

Figura 05 - Estrutura da Moringa Oleífera Lam

Fonte: Elaborado pela autora.

A Moringa Oleífera possui diversas utilidades e é considerada uma planta multiuso. Suas folhas, flores, sementes, casca e raízes têm sido utilizadas para diversas finalidades. Algumas das suas principais aplicação são: Na alimentação, medicina, tratamento e água, cosmético e agricultura (Tabela 04) [33].

Tabela 04 - Principais utilidades da Moringa Oleífera Lam

ÁREA DE ATUAÇÃO	UTILIDADES
Alimentação	As folhas, flores e sementes são comestíveis e possuem alto valor nutricional. As folhas são ricas em proteínas, vitaminas e minerais, além de serem fonte de antioxidantes. As sementes, por sua vez, são ricas em proteínas, óleos vegetais e apresentam atividade antibacteriana.
Medicinal	A Moringa Oleífera tem sido usada na medicina tradicional como um remédio natural para tratar diversas doenças, incluindo diabetes, hipertensão arterial, asma, artrite, anemia e problemas de pele.

Tratamento de água	A Moringa Oleifera é utilizada como coagulante natural no tratamento de água. Suas sementes contêm proteínas catiônicas que se ligam a partículas suspensas na água, formando flocos que podem ser facilmente removidos.
Cosméticos	O óleo extraído das sementes da Moringa Oleifera é utilizado na produção de cosméticos devido às suas propriedades hidratantes e emolientes. Ele pode ser encontrado em loções, cremes e sabonetes.
Agricultura	A Moringa Oleifera é uma planta resistente à seca e pode ser cultivada em solos pobres. Suas folhas e sementes também são utilizadas como adubo orgânico para melhorar a qualidade do solo e aumentar a produtividade de outras plantas.

Fonte: Elaborado pela autora com base em Sales (2018).

Dentre as diversas aplicações da moringa, o uso de suas sementes como coagulante natural no processo de clarificação de água tem se destacado no âmbito científico. Em sua composição química a semente de moringa apresenta cerca de 40% de proteínas catiônicas (Tabela 05), que são responsáveis por seu caráter coagulante, essas proteínas têm a capacidade de coagular partículas suspensas e impurezas na água ainda que em pequenas quantidades.

Tabela 05 – Composição química da semente de Moringa oleífera Lam

Composição	Sementes
Umidade (%)	6,30
Açúcares solúveis (g/100g)	3,14
Oligossacarídeos (g/100g)	3,31
Amido (g/100g)	6,02
Proteínas (g/100g)	39,3
Lipídeos (g/100g)	18,8

Fonte: Gallão *et al.* (2006).

O mecanismo de coagulação ocorre pela neutralização de cargas. Os polipeptídeos possuem uma carga positiva, enquanto as partículas suspensas possuem uma carga negativa. Quando adicionados na água, os polipeptídeos se ligam às partículas suspensas, formando complexos macromoleculares com carga positiva, o que leva a uma redução da carga líquida das partículas. Essa redução permite que as partículas se aproximem e se aglutinem, formando flocos maiores que podem ser facilmente separados da água [33].

Além disso, a *Moringa oleifera* também apresenta uma propriedade adsorvente, ou seja, é capaz de remover substâncias dissolvidas na água. Isso ocorre devido à presença de proteínas globulares em suas sementes, que possuem sítios de ligação para compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água [35].

A eficiência coagulante das sementes de MO pode sofrer influência de vários fatores, como pH, temperatura e concentração de partículas suspensas na água. Em geral, a coagulação é mais eficiente em pH neutro a ligeiramente ácido e a uma temperatura mais elevada. Além disso, a concentração ótima de MO varia dependendo da concentração de partículas suspensas na água [33].

Sales [33] avaliou o efeito de diferentes concentrações do pó das sementes de *Moringa* no tratamento da água do rio Xingu. O estudo se deu através de 6 diferentes concentrações de MO, variando de 80 a 2000mg.L⁻¹, com tempo de reação de 24 horas a uma temperatura de 25°C. No estudo foram avaliados diversos parâmetros, como o cloro livre, cor aparente, ferro total, pH, turbidez, *Escherichia coli* e coliforme totais. Os resultados mostraram que o uso das sementes de MO foi eficiente na redução dos parâmetros cloro residual livre, ferro total e turbidez, sem alterar o valor do pH. No entanto, a autora enfatizou a necessidade de combinar essa técnica com outras para atender aos padrões de todos os parâmetros requeridos pela legislação.

Existem diversos estudos na literatura que analisam a eficácia da utilização da *Moringa oleifera* Lam como substituto do coagulante químico sulfato de alumínio no tratamento de água. Geralmente, os parâmetros utilizados para comparar a eficiência dos coagulantes são a remoção de cor e turbidez por meio do processo de clarificação.

Nos estudos conduzidos por Fermino [36], os resultados indicaram que o coagulante natural apresentou melhor desempenho na redução da turbidez e da cor em comparação com o coagulante químico. A dosagem ótima para uma água bruta com turbidez de 157 NTU, cor de 360 uH e pH 8,14 foi de 20mg/L, resultando em uma eficiência de remoção de turbidez de 94,9%, remoção de cor de 92,5% e pH final de 8,12.

De acordo com os resultados obtidos por Siqueira [37], o sulfato de alumínio mostrou-se ligeiramente mais eficiente que a *Moringa oleifera* na remoção de turbidez, com uma diferença de 4,5%, e na remoção de cor, com uma diferença de 0,7%. Essas variações indicam uma pequena diferença entre os parâmetros de turbidez e cor. Além disso, o pH resultante após a adição de sulfato de alumínio foi de 7,29, praticamente igual ao pH obtido com a utilização da *Moringa oleifera*, que foi de 7,3.

Durante sua pesquisa, Rocha [38] realizou seis ensaios e obteve eficiência acima de 90% na remoção de turbidez e cor aparente em quatro deles, utilizando o coagulante de sulfato de alumínio. Já para as soluções de *Moringa oleifera*, a eficiência na remoção de cor e turbidez foi superior a 89% na maioria dos casos. Ele também observou que ao adicionar o sulfato de alumínio, o pH da solução ficou abaixo de 7 em todos os ensaios, com exceção de um. Enquanto isso, ao utilizar o coagulante de *Moringa oleifera*, o pH permaneceu dentro da faixa adequada.

2.7 Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é muito utilizado quando há muitos fatores a serem avaliados, isso porque uma quantidade reduzida de experimentos é suficiente para calcular os efeitos entre esses fatores [39].

A Tabela 06 apresenta um resumo com alguns dos fundamentos de um planejamento fatorial, tais como, fator, nível, modelo estatístico, efeito, efeito principal, efeito de interação e erro padrão para os efeitos [40].

Tabela 06 - Fundamentos do planejamento fatorial

Fator	Cada variável do sistema em estudo.
Nível	Condições de operação dos fatores de controle investigados nos experimentos. Geralmente são identificados por nível inferior (-) e nível superior (+).
Modelo estatístico	Modelo do tipo $y = b_0 + b_1 x_1$ sendo $b_0, b_1, \dots, b_n$ efeitos de cada fator na resposta.
Efeito	Mudança ocorrida na resposta quando se muda do nível inferior (-) para o nível superior (+). $efeito = R_+ - R_-$ sendo R_+ a média dos valores de resposta obtidos com valores superiores (+) do fator e R_- a média dos valores de resposta obtidos com valores inferiores (-) do fator, respectivamente.
Efeito principal	É a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado. Matematicamente o efeito principal pode ser representado por: Efeito Principal = $2 \left(\sum y^+ - \sum y^- \right) / (b^+)$ sendo $y^+ =$ a média dos efeitos individuais da medida, (+) e (-) corresponde ao nível superior e nível inferior, $b^+ =$ o número total de experimentos do planejamento.
Efeitos de interação	É a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator. Os valores de interação entre os fatores também podem ser calculados. Para tal, o efeito de interação entre as variáveis é obtido levando-se em consideração os sinais já atribuídos às variáveis envolvidas, como se fosse uma operação matemática de multiplicação.
Erro padrão para os efeitos	Erro na determinação dos efeitos. É o mesmo, tanto para os efeitos principais quanto para os de interação, e pode ser calculado por meio de equação. Erro Padrão do Efeito = $\frac{s}{\sqrt{2^{k-1}}}$ sendo $s =$ erro na medida (desvio padrão), $k =$ número de fatores experimentais no planejamento fatorial.

Fonte: Cunico (2008).

O planejamento fatorial é amplamente utilizado em investigações científicas e geralmente segue a notação b^k (onde b representa o número de níveis e k o número de fatores). Embora os planejamentos fatoriais com dois níveis (2^k) sejam os mais comuns, é difícil explorar completamente grandes regiões no espaço de variáveis (> 4) com um número reduzido de níveis. No entanto, eles ainda são vantajosos, pois permitem identificar tendências importantes para estudos futuros. A codificação dos níveis com sinais (+) e (-) é comum nesse tipo de planejamento, e a atribuição aos níveis superiores ou inferiores é arbitrária e não interfere nos experimentos ou interpretação dos resultados. Esses sinais também permitem esquematizar as variáveis na forma de matrizes de planejamento e calcular a influência das mesmas e de suas interações no sistema [40].

As vantagens do uso do planejamento fatorial, tais como: redução do número de ensaios; estudo simultâneo de diversas variáveis; confiabilidade dos resultados; realização da pesquisa em etapas; seleção das variáveis e número reduzido de ensaios; representação do processo estudado através de expressões matemáticas; elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos [40].

3 METODOLOGIA

Os experimentos deste trabalho foram realizados no Laboratório de Estudos em Química Ambiental (LEQA), Departamento de Química (DQ), Centro de Ciências Exatas e da Natureza (CCEN), Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

3.1 Amostragem

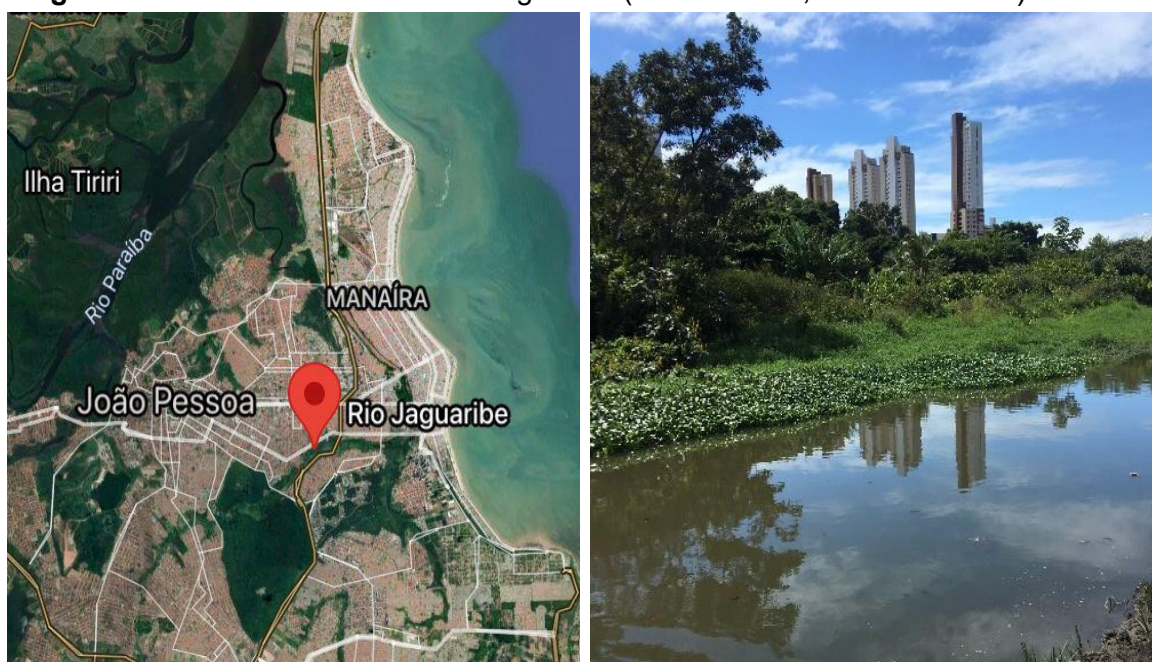
Foram coletadas amostras de águas superficiais de três dos principais rios da cidade de João Pessoa - PB, sendo eles: Rio Gramame (com dois pontos de coleta), Rio Cuiá (um ponto coleta) e Rio Jaguaribe (um ponto de coleta). Inicialmente a área de estudo escolhida foi o Rio Gramame, devido a sua importância, por ser a bacia hidrográfica responsável por cerca de 70% do

abastecimento público d'água da Grande João Pessoa, que compreende os municípios de João Pessoa, Cabedelo, Bayeux e parte de Santa Rita e das cidades de Pedras de Fogo e Conde [41].

Entretanto, as amostras obtidas nos pontos possíveis de coleta para esse rio apresentaram baixa turbidez (13,5 NTU) para o emprego do tratamento com a utilização da moringa, visto que esse tratamento em amostras com baixa turbidez, no geral, não apresenta alta eficiência, como apontado por Huang apud Balbinoti [10]. Tal problemática também foi encontrada na amostra do Rio Cuiá, com turbidez de 12,0 NTU, que, apesar de não atender a especificação de turbidez previstas na legislação (5,0 NTU), não se adequa a proposta do estudo.

Com isto, foi estabelecida a amostra do Rio Jaguaribe como objeto de estudo deste trabalho, que apesar de não ser caracterizada como água de abastecimento, tem uma importante representatividade local e apresenta valores de cor e turbidez elevadas, possibilitando, assim, uma melhor validação do tratamento proposto. A Figura 06 ilustra o ponto de coleta da amostra do rio Jaguaribe com coordenadas 7°07'36.9"S; 34°50'10.6"W.

Figura 06 - Ponto de coleta no Rio Jaguaribe (7°07'36.9"S; 34°50'10.6"W)



Fonte: Google Maps e arquivos da autora, respectivamente (2023).

As vargens foram coletadas de árvores de moringa no município de Santa Luzia-PB, no Sertão Paraibano (Figura 07). A escolha desse ponto de coleta foi com intuito de conhecer as propriedades coagulantes da espécie na região, já que sementes de moringa de diferentes fontes podem apresentar propriedades coagulantes diferentes [7]. O interesse em conhecer as propriedades das sementes dessa região foi para verificar sua aplicação em um futuro estudo em águas subterrâneas da região, a fim de atender a necessidade da comunidade local.

Após coletadas das vargens, foram extraídas as sementes e armazenadas em congelador, sendo removidas as cascas apenas no momento da preparação da massa. As sementes utilizadas para o estudo foram aquelas armazenadas até cerca de dois meses, pois com base em Katayon [42], as sementes coletadas até três meses apresentam melhor eficiência como agente coagulante.

Figura 07 – *Moringa Oleífera* Lam [a] árvore; [b] fruto (vargem); [c] semente



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Método

A massa de moringa foi preparada a partir da trituração das sementes em liquidificador. Já a granulometria foi ajustada com o uso de peneiras na faixa de 20 a 10 mesh.

Os ensaios de coagulação e floculação foram realizados em tanques descontínuos, do tipo batelada, em mesa agitadora com regulador de rotação a temperatura ambiente ($25,0 \pm 3,0^{\circ}\text{C}$).

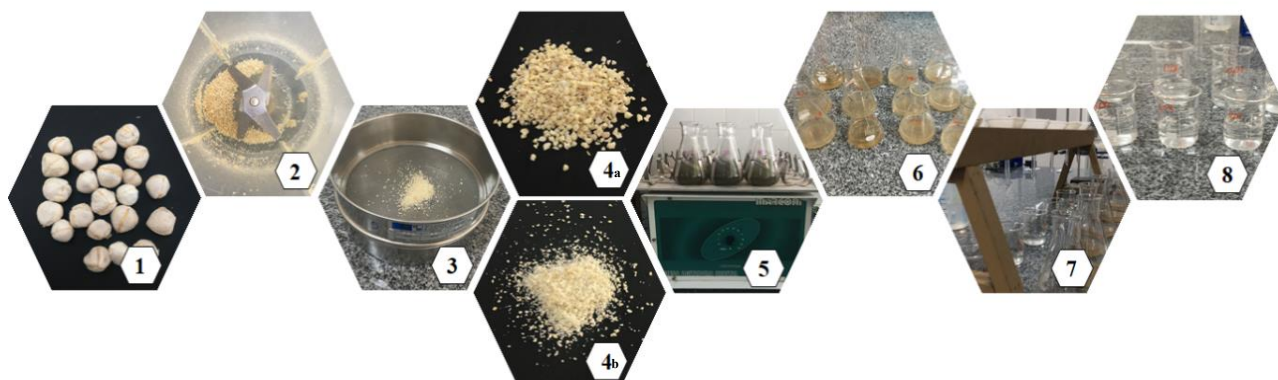
Um estudo preliminar foi realizado com o objetivo de avaliar o tempo de mistura rápida e lenta, pois de acordo com Borba [31] esse parâmetro influencia na eficiência de remoção. Ao fim desse estudo, foi definido o tempo de mistura rápida (TMR) em 3 min a 180 rpm e o tempo de mistura lenta (TML) em 15 min a 60 rpm.

A fim de definir a dosagem que maximizasse a remoção de cor e turbidez da água bruta, foram realizados no laboratório ensaios de clarificação, em triplicata, para as seguintes massas de MO 0,005g, 0,01g, 0,02g, 0,04g, 0,06g e 0,08g. As respectivas massas foram transferidas para *erlenmeyers* de 250 mL, contendo 100 mL da amostra. Na mesa agitadora, foram submetidos ao TMR e TML definidos em estudo precedente com tempo de sedimentação (TS) de 45 min. Ao fim do processo a amostra foi submetida a um sistema de filtração simples, utilizando papel de filtro qualitativo.

Em todos os estudos foi realizado um controle de monitoramento, chamado de branco (B), que corresponde a amostra bruta de água submetida a todo o processo com exceção a adição da massa de MO. Esse padrão de monitoramento foi utilizado nos cálculos a fim de subtrair a remoção de cor e turbidez proveniente dos processos de agitação, sedimentação e filtração, podendo, assim, avaliar separadamente a ação da moringa como coagulante.

A Figura 08 apresenta o procedimento de preparo e uso da moringa no processo de tratamento.

Figura 08 - Esquema do método de clarificação de águas superficiais utilizando *M. Oleífera* como coagulante



Fonte: Elaborado pela autora.

As sementes de moringa foram selecionadas de modo aleatório, descascadas (1) e trituradas em liquidificador (2) em rotação máxima por 5 min. A granulometria foi ajustada em peneiras na faixa de 20 a 10 mesh (3). O produto obtido foi de 850 μm (4a) e 200 μm (4b) de granulometria, foi pesado em balança analítica e transferido para *erlenmeyers* de 250mL contendo 100 mL de amostra. Em seguida, os *erlenmeyers* foram submetidos ao TMR (3 min a 180 rpm) e TML (15min a 60 rpm) na mesa agitadora (5). Ao término do processo de agitação, os *erlenmeyers* são reservados em bancada para sedimentação (6). Após o TS, o sobrenadante foi filtrado utilizando de papel de filtro qualitativo (7) para caracterização a partir das análises (8) de cor, turbidez e pH.

3.3 Otimização do método

A aplicação do planejamento fatorial neste trabalho se mostrou fundamental para a determinação das variáveis que exercem maior influência, a fim de obter as melhores condições e rendimentos nos experimentos. Para o estudo foi aplicado um planejamento fatorial 2^n ($n=3$), obtendo 8 ensaios que foram realizados em triplicata, totalizando 24 experimentos. Na Tabela 07, estão expressas as variáveis

utilizadas no planejamento, sendo elas: massa de moringa – M (com nível inferior de 0,01g e nível superior de 0,02g), granulometria – GR (com nível inferior de 850µm e nível superior de 2000µm) e tempo de sedimentação – TS (com nível inferior de 45 min e nível superior de 90min).

Tabela 07 - Níveis e fatores usados no planejamento fatorial 2³ para avaliar a utilização da M. Oleífera como coagulante no tratamento de águas superficiais

Variáveis	Nível	
	(-)	(+)
Massa de MO (g)	0,01	0,02
Granulometria (µm)	850	2000
Tempo de sedimentação (min)	45	90

Fonte: Elaborado pela autora.

A variável resposta do planejamento foi a porcentagem de remoção de cor e turbidez, calculada através das Equações 1 e 2.

$$Remoção\ de\ Cor\ (\%) = \frac{B_1 - A_n}{B_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde B₁ é o valor da cor do branco (B), ensaio que compreende a amostra que passou por todo o processo de clarificação, com exceção da adição do coagulante (moringa). A_n (n= número do ensaio; 1,2,3...8) é o valor de cor da amostra (A) que passou por todo o processo de clarificação, incluindo a adição do coagulante (moringa).

$$Remoção\ de\ Turbidez\ (\%) = \frac{B_1 - A_n}{B_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde B₁ é o valor da turbidez do branco (B), ensaio que compreende a amostra que passou por todo o processo de clarificação, com exceção da adição do coagulante (moringa). A_n (n= número do ensaio; 1,2,3...8), é o valor de turbidez

da amostra (A) que passou por todo o processo de clarificação, incluindo a adição do coagulante (moringa).

A Tabela 08 apresenta a matriz do planejamento fatorial utilizada, onde é possível ver de que forma essas combinações estão dispostas nos 8 ensaios.

Tabela 08 - Matriz do planejamento fatorial 2³

Ensaio	M (g)	GR (mesh)	TS (min)
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: Elaborado pela autora.

As respostas desses ensaios permitiram avaliar a significância de cada variável, bem como as interações entre elas. Permitindo chegar as melhores condições de trabalho para obter melhor eficiência no processo de clarificação para remover cor e turbidez. As réplicas ainda permitiram calcular o erro puro para resposta de remoção de cor e turbidez isolados.

3.4 Análise

A cor, turbidez e pH foram definidos como parâmetros de monitoramento do estudo, sendo realizados em todos os ensaios. Para medição da turbidez foi utilizado um Turbidímetro AP 2000 iR - Policontrol, determinando a turbidez pelo princípio de medição nefelométrico (NTU). As medidas de cor foram realizadas utilizando um Colorímetro Checker HI727 Hanna, determinando a cor da água por

unidade de cobalto de platina (PCU). O pH foi medido por potenciometria, a partir do método 4500-H+B, descrito pelo Standard Methods [43].

Conforme definida a melhor condição de trabalho para clarificação da amostra com base na eficiência de remoção de cor e turbidez, foi replicado o experimento em um volume maior de amostra e realizada a caracterização da mesma através dos parâmetros de Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A metodologia empregada nessas análises foi de incubação (NBR 12614:1992) para DBO e OD e refluxo fechado (NBR 10357:1988) para DQO [44, 45].

Os dados obtidos foram tratados estatisticamente pelo *software Statistica*, v. 7.0, onde foram plotados os gráficos de Pareto e superfície de respostas. Os demais gráficos foram plotados no *software Origin*.

4 RESULTADOS

4.1 Otimização da concentração de Moringa

Conforme descrito na metodologia, foram realizados 6 ensaios (em triplicata), com diferentes massas de moringa, no intuito de otimizar a concentração de moringa para sua utilização como coagulante natural no tratamento de águas superficiais com cor e turbidez elevadas. A Tabela 09 apresenta os valores de turbidez e cor obtidos nos ensaios, assim como o percentual de remoção de ambos.

Tabela 09 - Estudo de remoção de cor e turbidez com diferentes concentrações de moringa em granulometria aleatória. Amostra Bruta* Branco**

Massa de MO (g)	Cor (PCU)	Remoção de cor (%)	Turbidez (NTU)	Remoção de turbidez (%)
0,00 *	445	-	533	-
0,00 **	80,1	82	20,53	96,1
0,005	27,8	65,2	7,03	65,5

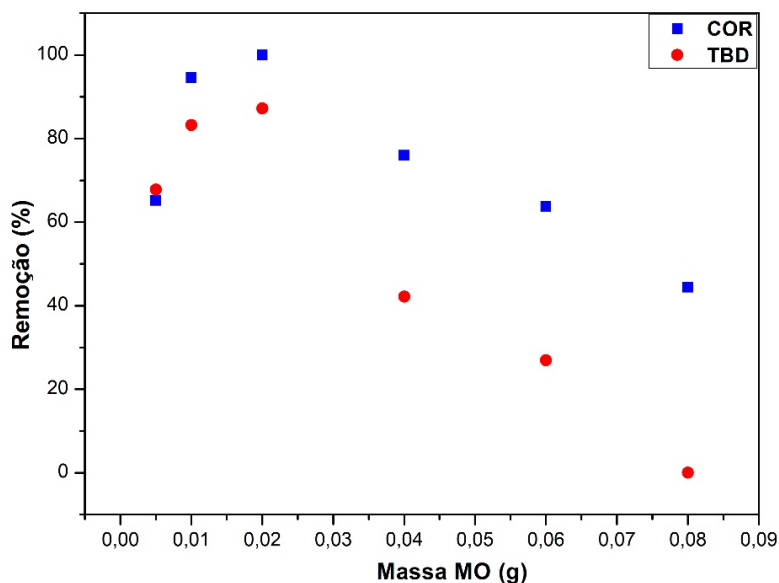
0,01	4,6	94,2	3,4	83,2
0,02	0	100,0	2,62	87,2
0,04	19,2	76,0	11,4	42,1
0,06	29,0	63,8	14,4	26,9
0,08	44,5	44,4	22,19	-8,12

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, recomenda-se para águas potáveis o valor máximo permitido (VMP) de 5,0 NTU para turbidez e 15 PCU para cor. Analisando a Tabela 09 é possível observar que a utilização das concentrações de 100mg.L^{-1} e 200mg.L^{-1} (correspondem a 0,01g e 0,02g, respectivamente) de moringa resultou em valores de cor (4,4 e 0 PCU) e turbidez (3,4 e 2,62 NTU) conformes ao padrão de potabilidade previsto pela legislação.

Na Figura 09 é possível visualizar o comportamento da variação da concentração de moringa com relação a resposta de remoção de cor e turbidez. Neste gráfico, a concentração de moringa está expressa em valores de massa de moringa adicionada em 100 mL de amostra.

Figura 09 - Estudo da remoção de cor e turbidez pela variação na massa de moringa



Fonte: Elaborado pela autora.

Em observação a Figura 09, podemos ver que adição de 0,005g correspondente a 50 mg.L^{-1} de moringa em solução, obteve baixa eficiência na remoção de cor e turbidez. Esse efeito ocorre devido à concentração insuficiente do coagulante para neutralizar as cargas negativas das impurezas presentes, fazendo com que parte das suspensões não formem flocos e continuam dispersas no meio [46].

Por outro lado, a adição excessiva do coagulante pode não só diminuir a eficiência do processo, como também ocasionar um efeito rebote. Nesse caso, quando a concentração de moringa excede o limite necessário para neutralizar as cargas, a suspensão resultante tem um excesso de proteínas, de caráter positivo, que ocasionam a reestabilização de partículas coloidais, aumentando a turbidez da amostra. Esse fenômeno é visto para a adição de 800 mg L^{-1} de moringa (0,08 g), que resultou em uma eficiência negativa, ou seja, houve um aumento da turbidez ao fim do processo [46].

4.2 Planejamento Fatorial 2^3

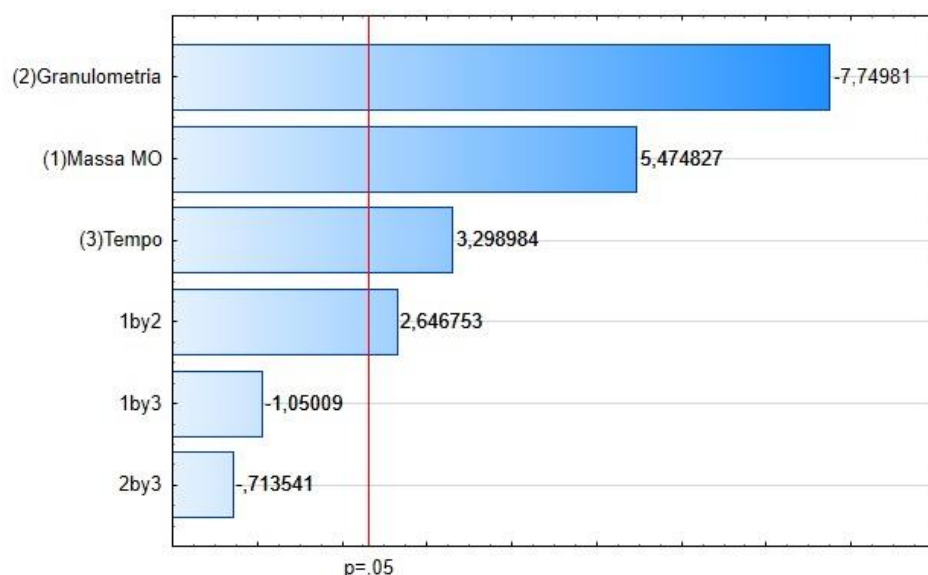
Com objetivo de determinar as melhores condições para o método, foi realizado um planejamento fatorial 2^3 . A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios do planejamento experimental utilizando a moringa como coagulante, no qual a resposta é a porcentagem de remoção de cor e turbidez. Os resultados mostram que os maiores rendimentos de clarificação da amostra foram nos ensaios 5, 6 e 2 para remoção de turbidez com 75,21%, 74,92% e 74,08%, respectivamente. Já para remoção de cor, foram os ensaios 2, 5 e 6 com 93,75%, 88,57% e 88,57%, respectivamente. A partir dos ensaios realizados em triplicata, foi possível determinar o erro puro de 3,67% para resposta de remoção de turbidez e 4,49% para respostas de remoção de cor. Os erros são considerados satisfatórios tendo em vista que o estudo foi realizado com uma amostra ambiental e conta com diversos fatores que não são possíveis de controle ou reprodução.

Tabela 10 - Resultado do Planejamento Fatorial 2³

Ensaio	Massa	Granulometria	Tempo de Sedimentação	% Remoção de Cor	% Remoção de Turbidez
1	-1	-1	-1	75,00	68,36
2	+1	-1	-1	93,75	74,08
3	-1	+1	-1	71,88	61,87
4	+1	+1	-1	84,91	67,87
5	-1	-1	+1	88,57	75,21
6	+1	-1	+1	88,57	74,92
7	-1	+1	+1	71,43	62,57
8	+1	+1	+1	80,00	71,34

Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico de Pareto (Figura 10) apresenta os efeitos, para o estudo de remoção de turbidez, das variáveis independentes e as interações de dois fatores sedimentação.

Figura 10 - Gráfico de Pareto do planejamento fatorial 2³ para remoção de turbidez

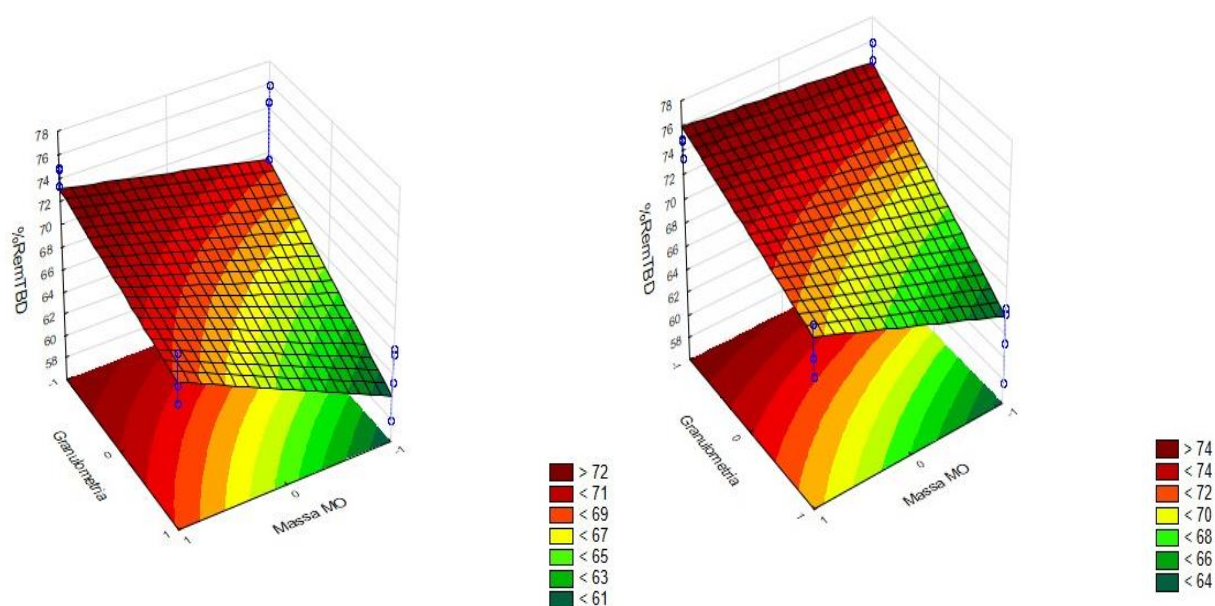
Fonte: Arquivos da autora.

A partir da análise da Figura 10, constata-se que as variáveis independentes, massa e tempo de sedimentação, possuem um efeito positivo significativo,

enquanto a variável granulometria apresenta um efeito negativo significativo com um nível de confiança de 95%. Embora o tempo de sedimentação apresente um efeito significativo positivo, o ensaio 2, que corresponde ao terceiro melhor resultado, possui a condição de nível inferior para essa variável, o que significa que a combinação das variáveis massa com nível superior e granulometria no nível inferior conferem alta eficiência, mesmo em um tempo de sedimentação menor. No entanto, apesar do interesse em reduzir o tempo de processo, a remoção alcançada nessas condições não atende a especificação de 5 NTU prevista na legislação. Assim, para uma remoção de turbidez satisfatória, recomenda-se as condições dos experimentos 5 e 6, que resultaram em uma turbidez final de 4,28 NTU e 3,61 NTU, respectivamente. É preferível adotar as condições do ensaio 5, visando a menor utilização de coagulante para atingir um resultado satisfatório.

As curvas de superfícies de repostas Figura 11 foram construídas com o objetivo de obter uma melhor visualização da interação das variáveis massa e granulometria com o tempo de sedimentação.

Figura 11 - Superfícies de respostas do planejamento fatorial 2^3 em função da porcentagem de remoção de turbidez [a] Granulometria e Massa; TS nível inferior (-1) [b] Granulometria e Massa; TS nível superior (+1)



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pela autora.

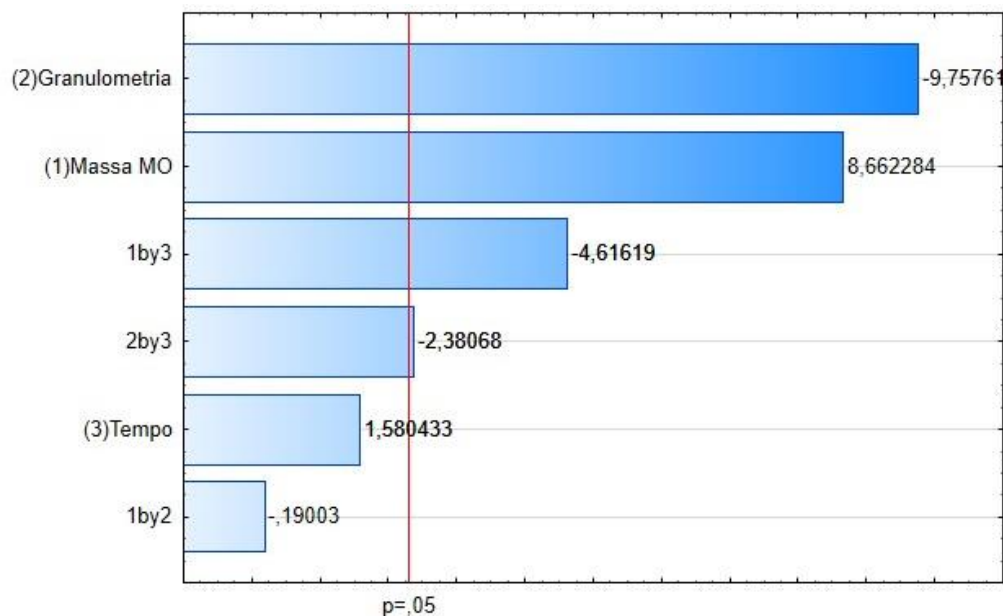
Nota-se que quando o tempo de sedimentação é menor há um impacto maior na significância da granulometria (Figura 11a), ou seja, nos ensaios com menor tempo de sedimentação é indicado usar a granulometria de nível inferior, pois a diferença de resposta para os ensaios com diferentes níveis de granulometria é maior do que nos ensaios em que o tempo de sedimentação é maior (Figura 11b). Assim, quando o tempo de sedimentação tem um nível superior a diferença entre os níveis superior e inferior de granulometria é obtido uma resposta de eficiência com diferença pequena. Isso ocorre, porque o tamanho da partícula impacta na eficiência de adsorção realizada pela moringa, já que quanto menor essa partícula melhor a interação entre os poros da superfície e as suspensões coloidais, possibilitando que o processo ocorra em menor tempo [32]

Já a variável massa, observa-se que quando o tempo de sedimentação é menor, a diferença de resposta para os níveis superior e inferior de massa é maior, sendo indicado o uso do nível superior dessa variável nos ensaios de menor tempo de sedimentação. Quando o tempo de sedimentação é maior, ainda há uma diferença nas respostas de eficiência, mas não tão expressivas.

Os melhores resultados da interação massa/granulometria correspondem a massa no nível superior e a granulometria nível inferior, em ambos os níveis da variável tempo de sedimentação.

O gráfico de Pareto (Figura 12) apresenta os efeitos, para o estudo de remoção de cor, das variáveis independentes e as interações de dois fatores.

Figura 12 - Gráfico de Pareto do planejamento fatorial 2^3 para remoção de cor

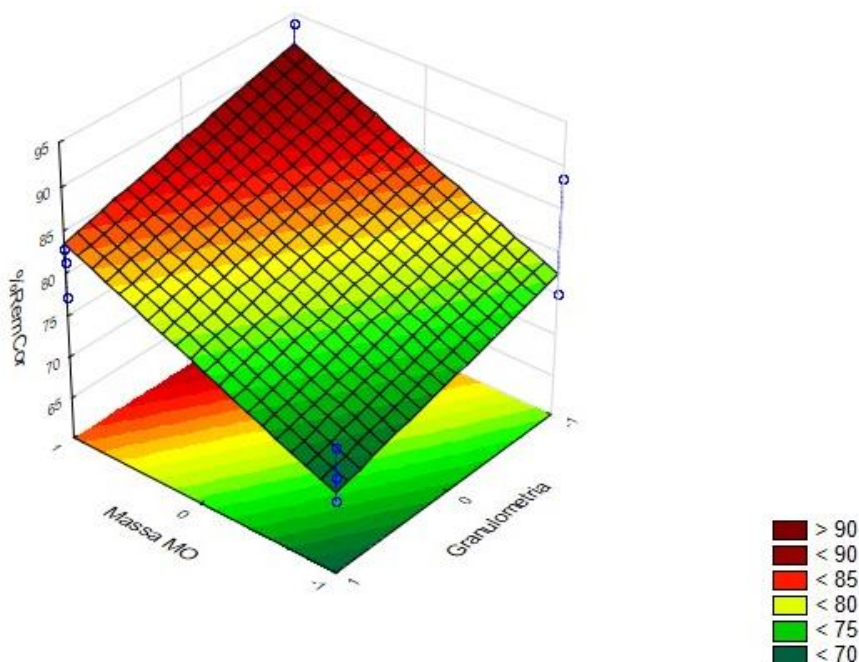


Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar que a variável independente, massa, apresentou efeito significativo positivo e a variável independente granulometria apresentou efeito significativo negativo; já a variável tempo de sedimentação não apresentou significância para remoção de cor de forma independente, mas foi significativa sua interação com as demais variáveis. O planejamento fatorial aplicado a remoção de cor teve como melhor resposta o ensaio 2 com menor granulometria e tempo de sedimentação, além de maior massa.

Para entender melhor o comportamento e a interação das variáveis, foi construída uma curva de superfície de resposta para variáveis granulometria e massa (Figura 13).

Figura 13 - Superfície de resposta do planejamento fatorial 2^3 em função da remoção de cor



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que há um aumento na remoção de cor, com maior massa (nível superior) e a menor granulometria (nível inferior), isso demonstra o quanto a interação dessas duas variáveis é importante para o experimento. Corroborando com a teoria de adsorção, ao fato de que quanto maior a área superficial na massa da moringa maior a disponibilidade de sítios ativos para o processo [32].

Dessa forma, para remoção de cor a condição ótima determinada é de massa 0,02 g e granulometria 850 μ m. Com relação a variável tempo observou-se que a melhor resposta foi para o ensaio com a variável em nível inferior, nesse caso, podemos atribuir o ocorrido a um efeito rebote do processo de floculação para os ensaios 5 e 6 que apresentam as variáveis massa e granulometria em suas condições ótimas, conforme a curva de superfície e a variável tempo de sedimentação em nível superior.

4.3 Caracterização da Amostra

A caracterização foi realizada na amostra bruta e na amostra submetida ao tratamento nas condições ótimas estabelecidas pelo planejamento fatorial, sendo elas: massa de moringa (200mg.L^{-1}), menor granulometria (20 mesh - $850\text{ }\mu\text{m}$) e maior tempo de sedimentação (90 min).

Na Tabela 11 estão descritos os valores obtidos para os parâmetros utilizados na caracterização da amostra, antes e depois do tratamento, bem como os valores máximos permitidos segundo a Portaria N° 888 de 2021 e Resolução N° 430 de 2011.

Tabela 11 - Caracterização da amostra do Rio Jaguaribe

Amostra	Turbidez (NTU)	Cor (PCU)	pH	OD	DBO	DQO
				mg.L ⁻¹		
Ambiental (AMB)	500	445	7,90	4,69	3,63	216,6
Tratada (A)	2,37	10	8,03	4,76	4,44	236,2

Nota: VMP: turbidez – $5,0\text{ NTU}$; cor – 15 PCU ; pH $6,0 - 9,5$; OD – $5,0\text{ mg.L}^{-1}$ e DBO – 120 mg.L^{-1} .

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação ao pH, foi observado uma pequena alteração, corroborando com a afirmação feita por Ndabigengesere e Narasiah [47], eles observaram que o coagulante da moringa submetido ao tratamento de água não expressava mudanças significativas no valor do pH.

A cerca do Oxigênio Dissolvido sabemos que é um dos parâmetros mais significativos para expressar a qualidade do ambiente aquático e suas variações estão associadas aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos corpos d'água. Para a manutenção da vida aquática aeróbica são necessários teores mínimos de oxigênio dissolvido de 2 mg L^{-1} a 5 mg L^{-1} [48]. Observando os valores de OD presentes na Tabela 11, verifica-se que o teor mínimo de oxigênio dissolvido é atendido tanto na amostra bruta quanto na tratada.

Comparando os estudos de Franco [49], que apontaram a utilização de moringa como causa da redução do oxigênio dissolvido em suas amostras,

podemos dizer que a concentração de moringa otimizada neste estudo é eficaz na remoção de cor e turbidez, e não diminui o oxigênio disponível no meio, tornando o método aqui descrito como satisfatório nesse aspecto.

Os parâmetros DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio) são utilizados para indicar a presença de matéria orgânica na água. Sabe-se que a matéria orgânica é responsável pelo principal problema de poluição das águas, que é a redução na concentração de oxigênio dissolvido. Isso ocorre como consequência da atividade respiratória das bactérias para a estabilização da matéria orgânica. Visto isso, os referidos parâmetros DBO e DQO indicam o consumo ou a demanda de oxigênio necessário(a) para estabilizar a matéria orgânica contida na amostra de água [49].

Em observação a Tabela 11, nota-se que houve um pequeno aumento nos valores de DBO e DQO da amostra tratada quando comparada a amostra ambiental antes do tratamento. O aumento de DBO na água tratada com moringa também foi observado por Andrade, que aponta a diminuição na capacidade de remoção de DBO e DQO simultaneamente com o aumento da dosagem de MO [50]. Entretanto, o aumento foi de poucas unidades, não justificando a necessidade de extração de moringa do meio, o que resultaria em custos adicionais ao processo.

Para DQO era esperado um aumento para a amostra tratada com moringa, já que a adição desta eleva a carga orgânica e, consequentemente, a demanda química de oxigênio. No entanto, como a concentração de moringa otimizada é consideravelmente baixa, esse aumento se deu em poucas unidades.

A partir da relação entre os valores de DQO/DBO, obtemos o grau de biodegradabilidade, esse parâmetro indica a parcela de matéria orgânica que pode ser estabilizada por via biológica. Para um dado efluente, se a relação $DQO/DBO < 2,5$ ele é facilmente biodegradável, se essa relação for $5,0 < DQO/DBO < 2,5$ irá exigir cuidados na escolha do processo biológico para remover a carga orgânica presente, e se $DQO/DBO > 5$, o processo biológico tem pouca chance de sucesso, sendo assim necessária uma oxidação química para tratar o meio [50]. No presente estudo essa correlação é relativamente alta (46,18 para a água bruta e 53,19 para a água tratada), indicando uma baixa fração de

biodegradabilidade, assim sendo recomendado a realização de um tratamento físico-químico para remoção dos constituintes não biodegradáveis remanescentes [52,53].

4.4 Considerações sobre o método

Para promover uma comparação com os estudos utilizados no levantamento bibliográfico, foi construída a Tabela 12, que expressa os resultados da eficiência do processo por completo, ou seja, nesse cálculo não foi subtraído o valor da amostra de controle, sendo considerada a contribuição dos processos de agitação, sedimentação e filtração na remoção da cor e turbidez.

Tabela 12 - Avaliação do método otimizado utilizando diferentes concentrações de moringa em função da eficiência da remoção de cor e turbidez

Massa de MO (mg L ⁻¹)	Cor (PCU)	Remoção de Cor (%)	Turbidez (NTU)	Remoção de Turbidez (%)
0,00 *	445	-	533	-
50	27,8	93,5	7,03	98,68
100	4,6	99,0	3,4	99,36
200	0	100,0	2,62	99,50
400	19,2	95,68	11,4	97,86
600	29,0	93,5	14,4	97,30
800	44,5	90	19,7	96,30

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que quando avaliado o método de modo geral, levando em consideração ação coagulante da moringa, o tempo de mistura rápida e lenta, o tempo de sedimentação e a filtração simples, a eficiência passa de 87,20% para 99,50%. Na Tabela 13 é possível compararmos a concentração de moringa ótima utilizada para conformidade da amostra de turbidez inicial de 500 NTU deste

trabalho, com as concentrações utilizadas em outros estudos para tratar amostras de turbidez menores.

Tabela 13 - Comparação das concentrações de moringa utilizadas em diferentes estudos, para remoção de turbidez

Estudo	Concentração de Moringa (mg L ⁻¹)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	Eficiência do Método (%)
PATERNIANI, 2009	500	400	0,36	99,9
FRANCO, 2012	131	117	12,87	89
RIAÑOS-DONADO, 2019	500	320	20,9	93,4
KATAKYON, 2006	400	390	23,4	94
Presente estudo, 2021	200	530	2,65	99,5

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência do método otimizado neste trabalho é notável, uma vez que foi possível alcançar a conformidade da amostra utilizando uma concentração de coagulante relativamente baixa em comparação a outros estudos, considerando a turbidez inicial das amostras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi comprovado que a moringa é um agente coagulante altamente eficiente para remover cor e turbidez, atingindo uma taxa de remoção de turbidez de 87,20% e 100% de cor. É importante ressaltar que essa avaliação foi realizada de forma isolada, desconsiderando a contribuição do sistema na clarificação da amostra. A cerca da caracterização da amostra foram obtidos resultados já esperados, que corroboram com a literatura para esse tipo de corpo hídrico analisado OD (4,76 mg L⁻¹), DBO (4,44 mg L⁻¹) e DQO (236,2 mg L⁻¹), com alteração pequena do pH.

De modo geral o método aplicado mostrou-se satisfatório para clarificação de amostras com alto teor de cor e turbidez, alcançando 99,50% de eficiência para remoção de turbidez e 100% para remoção de cor, nas condições: 200mg L⁻¹ do coagulante Moringa Oleífera Lam, tempo de mistura lenta de 3 min a 180 rpm,

tempo de mistura rápida de 15 min a 60 rpm, tempo de sedimentação de 90 min e filtração simples. Em virtude da simplicidade do método, este é possível de reprodução para tratamento de água doméstico, recomendado para comunidades que têm difícil acesso a água de abastecimento público. Já a nível de tratamento em estações de tratamento de água (ETA), é recomendável estudos mais avançados para utilização do coagulante natural a base de MO em grande escala.

Com este trabalho, também foi possível concluir que as sementes de moringa coletadas no município de Santa Luzia-PB têm propriedades coagulantes satisfatórias e podem ser empregadas para esse fim em demais estudos.

REFERÊNCIAS

- [1] FRANCO, M.; SILVA, K.E.; PATERNIANI, J. E. Water Treatment By Multistage Filtration System With Natural Coagulant From Moringa Oleifera Seeds. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v. 32, n. 5, p. 989-997, set./out. 2012.
- [2] BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Brasília, 2021.
- [3] SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Relatório de qualidade das águas interiores do São Paulo. *In*: **Apêndice E: Significado Ambiental e Sanitário das variáveis de qualidade**. São Paulo, 2020.
- [4] KNEVITZ, L. A. **Avaliação da eficiência de remoção de turbidez de um sistema de clarificação**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2017.
- [5] CARDOSO, K. C. *et al.* Optimizing mixture and decantation times in the process of coagulation/flocculation of raw water using Moringa oleifera Lam. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá-PR, v. 30, n. 2, p. 193-198, 2008.
- [6] MONACO, P. A. L. *et al.* Ação Coagulante do Extrato de Sementes de Moringa Preparado em Diferentes Substâncias Químicas. **Engenharia na Agricultura: REVENG**, Viçosa-MG, v. 20, n. 5, p. 453-459, set./out. 2012.
- [7] RIAÑOS-DONADO, K.; MEZA-LEONES, M.C.; MERCADO-MARTÍNEZ I. D. Clarification of the water of wetlands using a mixture of natural coagulants. **Revista DYNA**, v. 86, n. 209, p. 73-78, abr./jun. 2019.
- [8] LIMA, P. R.; ALMEIDA, I. V.; VICENTINI, V. E. P. The use and types of natural coagulants in water treatment. **Evidência**, Joaçaba-SC, v. 20, n. 1, p. 9-22, jan./jun. 2020.
- [9] BALBINOTI, J. R.; BEGHETTO, C. L.; SILVA, L. A.; CORAL, L. A.; BASSETTI, F. J. Uso de sementes de Moringa oleífera como agente coagulante para o tratamento de água. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 11, n. 5, p. 1748-1760, 2018.
- [10] MATARUCO, S. M. C. *et al.* Control of coliform in effluent with the use oil of Eucalyptus Citriodorus extract seed of Moringa Oleífera. **Revista de Conhecimento Online**, Novo Hamburgo-RS, v. 11, n. 1, jan./abr. 2019.
- [11] BAPTISTA, A.T.A.; SILVA, M.O.; GOMES, R.G.; BERGAMASCO, R.; VIEIRA, M. F.; VIEIRA, A. M. S. Protein fractionation of seeds of Moringa oleifera Lam and

its application in superficial water treatment. **Separation and Purification Technology**, Amsterdã-NL, v. 180, p. 114-124, 2017.

[12] BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Campinas, Editora da Unicamp, 1995, 299 p.

[13] ALVES, B.S.G. **Análise das variáveis do processo de coagulação-floculação para clarificação de água superficial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

[14] LONGUINHO, D. Velho Chico: rio percorre a cultura, a história e a economia do país. **Agência Brasil**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-06/velho-chico-rio-percorre-cultura-historia-e-economia-do-pais>. Acesso em: 20 abr. 2023.

[15] HIRATA *et al.* **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. 4. ed. São Paulo: USP/Instituto de Geociências, 2019.

[16] GOMES, E.R.A.; SANTOS, T.A S. **Avaliação da eficiência da Moringa Oleífera Lam no tratamento de água e efluentes**. Monografia (Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021.

[17] NOWACKI, C. C. B.; RANGEL, M.B. **Química ambiental**: conceitos, processos e estudo dos impactos ao meio ambiente. 1. ed. Pinheiros-SP: Érica, 2014.

[18] SANTOS, R.L. **Uso de Moringa Oleífera Lam como coagulante no tratamento de água: revisão da literatura**. Monografia (Bacharel Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia). Universidade Federal Rural do Semiárido, Pau dos Ferros, 2022.

[19] COSTA, S.C. **comparação do lodo do tratamento de água gerado pelo uso de coagulante orgânico e inorgânico**. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021.

[20] BRASIL. Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 410, de 13 de maio de 2011**. Brasília, 2011.

[21] LIMA, V.R.N. **Tratamento de água com coagulantes naturais em uma comunidade do estado do Ceará**. Monografia (Bacharel em Agronomia). Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2022.

[22] FALCADE, D.R.; MANNICH, M.; COLOMBO, G.T. **Tubo de turbidez para determinação de baixo custo da turbidez em corpos d'água superficiais**. REGA – Revista de Gestão de Água da América Latina. Porto Alegre, v 14, p. 18, 2017.

[23] FUNASA. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília, DF: Ministério da Saúde. 1. ed., p. 19, 2014.

[24] MANAHAN, S. E. **Química Ambiental**. 9. ed. Porto Alegre-RS: Bookman, 2013.

[25] RIBEIRO, L.C. **Características dos flocos formados com a utilização de Moringa Oleífera como coagulante em água produzida com cor elevada**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

[26] CARVALHO, M. J. H. **Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, 2008.

[27] MURAKAMI, M. F. **Resistência à quebra e recrescimento de aglomerados formados pela adição de Tanino e Moringa Oleífera Lam como alternativa de pós-tratamento de efluentes agropecuários codigeridos em reatores UASB**. Tese (Doutor em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2021.

[28] OLIVEIRA, M. I. V. **Utilização de sementes de moringa oleífera como coagulante natural no tratamento de água de abastecimento**. Relatório do Projeto Responsabilidade Social (Utilização de sementes de moringa oleífera como coagulante natural no tratamento de água de abastecimento) – Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, 2019.

[29] ARAUJO, Y. C. A. **Produção de biocoagulante a partir de sementes de Moringa Oleífera para substituição de Sulfato de Alumínio no tratamento de águas em ETAs**. Monografia (Bacharel em Engenharia Química). Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2021.

[30] PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.

[31] BORBA, L.R. **Viabilidade do uso da Moringa oleífera Lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades**. 2001. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2001.

[32] CEZAR, K. L. **Avaliação da Moringa oleífera Lam na remoção do corante remazol ultra amarelo RGBN**. Dissertação (Mestre em Química). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

- [33] SALES, A. S. **Utilização de sementes de Moringa oleífera Lam no tratamento de água para consumo humano**. Monografia (Bacharel em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Pará, Altamira, 2018.
- [34] GALLÃO, M.I; DAMASCENO, F.; BRITO, E.S. **Chemical and structural evaluation of moringa seeds**. Revista Ciência Agronômica, v.37, n.1, p.106-109, 2006.
- [35] ARAUJO, K. C. **Avaliação da utilização da Moringa oleífera Lam no tratamento de efluentes da produção de biodiesel**. Dissertação (Mestre em Química). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- [36] FERMINO, L. S. *et al.* **Water Treatment with Conventional and Alternative Coagulants**. Chemical Engineering Transactions, v. 57, p. 1189-1194, 2017.
- [37] SIQUEIRA, A. P. S. *et al.* **Análise da performance dos coagulantes naturais Moringa oleífera e tanino como alternativa ao sulfato de alumínio para o tratamento de água**. Enciclopédia Biosfera, v.15, n. 27, p. 18-29, 2018.
- [38] ROCHA, V. V. F. *et al.* **Clarification of high-turbidity waters: a comparison of Moringa oleifera and virgin and recovered aluminum sulfate- based coagulants**. Environment, Development and Sustainability, v. 22, n. 5, p. 4551–4562, 2020.
- [39] ARRUDA *et al.* **Planejamento fatorial para otimização das condições da reação de transesterificação alcalina do óleo de pequi (Caryocar brasiliense Cambess)**. Engevista, Niterói-RJ, v. 19, n. 1, p. 132-145, jan. 2017.
- [40] CUNICO *et al.* **Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica**. Visão Acadêmica, Curitiba-PR, v. 9, n. 1, p. 23-32, jan./jun. 2008.
- [41] PARAÍBA. **Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA)**. Campina Grande, 2021.
- [42] KATAYON *et al.* Effects of storage conditions of Moringa oleifera seeds on its performance in coagulation. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 1455-1460, 2006.
- [43] ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. American Public Health Association (APHA). American Water Works Association (AWWA). Water Environment Federation (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington, D.C., 2005.
- [44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12614: **Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) – Método de incubação (20°C, cinco dias)**. Rio de Janeiro, 1992.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10357: **Águas – Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) – Método de refluxo**

aberto, refluxo fechado – Titulométrico e refluxo fechado – Colorimétrico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988.

[46] RIBEIRO, V. M. R.; ANDRADE, P. V.; REIS, A. G. Moringa oleifera seed as a natural coagulant to treat low-turbidity water by in-line filtration. **Revista Ambiente & Água**, São Paulo-SP, v. 14, n. 6, Taubaté, 2019.

[47] NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G. Active **agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera**. **Water Research**, v. 29, n. 2, p. 703–710, 1995.

[48] Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília-DF: MS/FUNASA, 2014.

[49] FRANCO, M. **Uso de coagulante extraído de sementes de Moringa oleífera como auxiliar no tratamento de água por filtração em múltiplas etapas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2010.

[50] ANDRADE, P. V. **Uso da semente Moringa Oleífera como coagulante no tratamento terciário de efluente sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, São José dos Campos-SP, 2021.

[51] METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater Engineering: treatment and Resource Recovery**. 5 ed. Nova Iorque: McGraw Hill Education, 2016.

[52] PATERNIANI, J. E. S.; MANTOVANI, M. C.; SANT'ANNA, M. R. Uso de sementes de Moringa oleífera para tratamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 13, n. 6, p. 765-771, 2009.