

LETICIA CARDOSO MADUREIRA TAVARES

**USO DE *Guazuma ulmifolia* COMO COAGULANTE AUXILIAR NO
TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

Orientador: Alisson Carraro Borges

VIÇOSA - MINAS GERAIS

2020

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

T231u
2020

Tavares, Letícia Cardoso Madureira, 1992-

Uso de *Guazuma ulmifolia* como coagulante auxiliar no
tratamento de água para abastecimento / Letícia Cardoso
Madureira Tavares. – Viçosa, MG, 2020.

58 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Alisson Carraro Borges.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Biopolímeros. 2. Água - Purificação. 3. Floculantes.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

II. Título.

CDD 22 ed. 620.1920287

LETICIA CARDOSO MADUREIRA TAVARES

**USO DE *Guazuma ulmifolia* COMO COAGULANTE AUXILIAR NO
TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 7 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Leticia Cardoso Madureira Tavares
Autora



Alisson Carraro Borges
Orientador

Dedico esta dissertação aos meus pais. Os dois maiores incentivadores das realizações dos meus sonhos. Muito obrigada

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dares exatamente o que preciso e sempre na hora certa.

Aos meus pais, Luiz e Silvia, pela base, carinho e pelo apoio incondicional. Sem vocês não chegaria até aqui.

À minha família, pelo apoio e compreensão nos momentos em que não pude estar presente. Em especial, aos meus tios Sueli, Jorge, Fortunato e Fátima.

Ao meu marido Guilherme, que sempre me incentivou e me apoiou ao longo dessa caminhada. Nossos debates sobre estatística chegavam até o Homem-Aranha e a Mary Jane.

Ao meu orientador prof. Dr. Alisson Borges, por todos ensinamentos, pela confiança, paciência, apoio e valiosas sugestões que me proporcionou ao longo desta trajetória.

Aos meus coorientadores André Rosa e Teresa Cristina, pela coorientação e por todos ensinamentos ao longo desta trajetória.

Aos estagiários, Walas e Joost, pelo comprometimento e dedicação com o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao técnico Simão.

A todos os amigos do Laboratório da Qualidade Ambiental (LQA), pelo apoio e amizade: Aline, Cris, Izabelle, Ligia, Lucas, Priscila e Pamela. Em especial, as amigas Amanda Braga, Juciara e Ana Paula, sempre dispostas a me ajudar com seus conhecimentos.

À minha amiga Amanda Dias, por todo apoio e disponibilidade ao longo dessa pesquisa. Principalmente, pela compreensão nos dias difíceis e pelo conhecimento compartilhado.

Aos amigos de longa data, Fernando, Caroline e Milena que sempre se fizeram presentes.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização desse trabalho.

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

A todos, que direta ou indiretamente me ajudaram nessa, e em todas as outras conquistas, meu mais sincero agradecimento.

“The greatest enemy of knowledge is not ignorance; It is the illusion of knowledge.”

Stephen Hawking

RESUMO

TAVARES, Leticia Cardoso Madureira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Uso de *Guazuma ulmifolia* como coagulante auxiliar no tratamento de água para abastecimento.** Orientador: Alisson Carraro Borges.

Os sais metálicos, especialmente os sais de alumínio, são tradicionalmente os mais empregados no tratamento de água. Contudo, devido aos efeitos deletérios associados ao alumínio residual na água tratada e a dificuldade de dispor o lodo gerado, os polímeros naturais têm sido cada vez mais estudados. Na literatura revisada, os polímeros naturais mais reportados são a *Moringa oleifera* e a quitosana. Porém, ainda são escassos os trabalhos referentes ao uso de polímeros naturais atuando como coagulantes auxiliares. Portanto, no presente trabalho estudou-se o uso de um novo e potencial coagulante auxiliar, a *Guazuma ulmifolia* (mutamba), para tratar água sintética empregando a metodologia de superfície de resposta. Além disso, neste trabalho se propôs a realização de uma revisão de literatura especificamente sobre o emprego de polímeros naturais como auxiliares de coagulação a sais metálicos no tratamento de água a fim de identificar as lacunas do conhecimento e oportunidades de pesquisa. Os principais fatores para o processo de coagulação/floculação avaliados foram dose dos coagulantes e pH. Com o processo de modelagem observou-se que o modelo quadrático foi o mais apropriado para descrever o processo de coagulação/floculação, tendo este sido validado. O efeito quadrático do pH, a interação entre a dose de mutamba e o pH e a interação entre a dose de sulfato de alumínio e a dose de mutamba foram significativos ($p \leq 0,05$). As condições ótimas previstas pelo modelo foram 5 mg L⁻¹ de sulfato de alumínio, 2,5 mg L⁻¹ de mutamba e pH 9. Ademais, o polímero estudado apresentou características aniônicas (-31,9 mV) atuando, predominantemente, por adsorção e formação de pontes.

Palavras-chave: Polímero natural. Mutamba. Tratamento de água.

ABSTRACT

TAVARES, Leticia Cardoso Madureira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Using *Guazuma ulmifolia* as a coagulant aid in water treatment.** Advisor: Alisson Carraro Borges.

Metal salts, especially aluminum salts, are traditionally the most employed in water treatment. However, due to the deleterious effects associated with residual aluminum in treated water and the difficulty of disposing of the generated sludge, natural polymers have been increasingly studied. In the reviewed literature, the most commonly reported natural polymers are *Moringa oleifera* and chitosan. However, there are still few studies on the use of natural polymers acting as coagulants aids. Therefore, the present work optimized the use of a potential new coagulant aid, *Guazuma ulmifolia* (mutamba), to treat synthetic water using the surface response methodology. In addition, this work aimed to conduct a literature review specifically on the use of natural polymers as coagulation aids to metal salts in water treatment in order to identify knowledge gaps and research opportunities. The main factors for the coagulation-flocculation process evaluated were coagulant dose and pH. The modeling process revealed that the quadratic model was the most appropriate to describe the coagulation-flocculation process, which has been validated. The quadratic effect of pH, the interaction between mutamba dose and pH and the interaction between aluminum sulfate dose and mutamba dose were significant ($p \leq 0.05$). The optimal conditions predicted by the model were 5 mg L⁻¹ aluminum sulfate, 2.5 mg L⁻¹ mutamba and pH 9. Moreover, the studied polymer presented anionic characteristics (-31,9 mV) acting by adsorption and bridging.

Keywords: Natural polymer. Mutamba. Water treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Classificação de material comumente presente em águas naturais.	16
Figura 2.2– Modelo da dupla camada difusa.	18
Figura 2.3– Esquema do mecanismo de neutralização de cargas por meio de íons de ferro (III).	19
Figura 2.4 – Mecanismo de coagulação por varredura.	20
Figura 2.5 – Mecanismo de adsorção e formação de pontes (ligações).	21
Figura 3.1 – Etapas do processo de preparo da mutamba para extração. Em A: local onde foi realizada a coleta da casca de mutamba; em B: casca da mutamba após ser seca em estufa; em C: casca da mutamba sendo triturada; em D: material obtido sendo homogeneizado; em E: produto final empregado para preparo do extrato salino.	38
Figura 3.2 – Jar test de 6 cubas utilizado nos ensaios de coagulação- floculação e sedimentação.	38
Figura 3.3 – Equipamento utilizado para a análise do potencial zeta.	41
Figura 3.4 – Efeitos de Pareto para turbidez removida ao nível de 5% de significância.	44
Figura 3.5 – Gráfico de contorno 3 em 1 da turbidez removida com as interações de dose de sulfato de alumínio em mg. L^{-1} (A); dose de mutamba em mg. L^{-1} (B) e pH (C).	46
Figura 3.7 – Ensaio de validação do ponto ótimo com as três repetições. (a) corresponde ao estado inicial; (b) após a sedimentação.	48
Figura 3.8 – Gráfico dos valores observados x valores preditos de turbidez removida (UNT)	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estudos sobre polímeros naturais como coagulantes auxiliares para tratamento de água.....	25
Tabela 3.1 – Níveis codificados e reais das variáveis independentes no DCCR.	40
Tabela 3.2 – Valores codificados e reais do DCCR e variável resposta.	43
Tabela 3.3 – Dados do modelo ajustado.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
2. REVISÃO: USO DE POLÍMEROS NATURAIS COMO COAGULANTES AUXILIARES NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO	15
2.1 INTRODUÇÃO.....	15
2.2 COLÓIDES	16
2.3 MECANISMOS DE DESESTABILIZAÇÃO DE PARTÍCULAS COLOIDAIAS.....	17
2.3.1 Compressão da camada difusa	17
2.3.2 Adsorção-neutralização de cargas	19
2.3.3 Varredura	20
2.3.4 Adsorção-formação de pontes.....	20
2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA COAGULAÇÃO/ FLOCULAÇÃO	21
2.5 COAGULANTES.....	23
2.6 POLÍMEROS NATURAIS COMO AUXILIARES DE COAGULAÇÃO	24
2.7 CONSIDERAÇÕES E PESQUISAS FUTURAS	28
2.8 REFERÊNCIAS.....	28
3. USO DE <i>Guazuma ulmifolia</i> COMO COAGULANTE AUXILIAR NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO	35
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.2.1 Preparo da água sintética.....	37

3.2.2	Preparo da solução de sulfato de alumínio	37
3.2.3	Preparação do extrato de mutamba	37
3.2.4	Ensaio de coagulação/ floculação	38
3.2.5	Planejamento experimental	39
3.2.6	Potencial zeta.....	40
3.2.7	Análise estatística	41
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.3.1	Caracterização do extrato de mutamba	42
3.3.2	Análise da turbidez	42
3.3.3	Otimização	45
3.3.4	Validação	48
3.4	REFERÊNCIAS	51
4.	CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
4.1	CONCLUSÕES.....	57
4.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58

1. INTRODUÇÃO GERAL

O rápido desenvolvimento industrial proporcionou aumento na geração de águas residuárias, que por sua vez não são tratadas adequadamente, e consequentemente poluem os cursos hídricos. Desta forma, tecnologias eficientes para o tratamento de água são imprescindíveis.

O processo de coagulação / floculação é um dos mais empregados para tratar água para abastecimento, devido ao custo-benefício e relativa simplicidade de operação. Historicamente, os sais de ferro e alumínio são os mais utilizados para esta finalidade, posto que são eficientes na neutralização das cargas da suspensão que geralmente apresentam caráter negativo.

Contudo, os coagulantes metálicos apresentam algumas desvantagens como alteração do pH da água tratada, corrosão de tubulações, lodo de difícil tratamento e destinação e, em particular os sais de alumínio têm sido associados ao aparecimento de doenças neurodegenerativas, como o Alzheimer.

Desta forma, os coagulantes auxiliares são frequentemente utilizados para aumentar a eficiência do processo e diminuir o residual de alumínio na água tratada. A elevação da eficiência relaciona-se com a boa capacidade de formação de pontes que os polímeros exibem, permitindo que flocos maiores sejam formados e, consequentemente sedimentados com mais facilidade.

Geralmente, os polímeros mais utilizados para atuar como auxiliar de coagulação são os sintéticos, como a poliacrilamida. Porém, estes assim como os sais de alumínio impõem risco para a saúde e ao ambiente. Desta forma, o emprego de polímeros naturais como auxiliar de coagulação é uma alternativa em potencial para reduzir o uso de sulfato de alumínio.

Os polímeros naturais apresentam muitas vantagens como biodegradabilidade, não toxicidade, não são corrosivos e podem ser selecionados de acordo com a disponibilidade do produto na região, diminuindo assim os custos associados à logística. Todavia, quando estes são empregados como coagulantes principais, dependendo da turbidez inicial não são capazes de desestabilizar efetivamente a suspensão. Além disso, se forem empregados em doses mais elevadas podem funcionar como aporte de matéria orgânica para a suspensão causando danos ao processo.

Por outro lado, como os polímeros naturais apresentam características muito distintas dos coagulantes inorgânicos, os mecanismos de coagulação podem se somar e o processo de coagulação / floculação ser otimizado, tanto na eficiência de remoção de turbidez / cor quanto na diminuição dos custos de disposição dos lodos.

A melhora do rendimento de processos é extremamente importante e é usualmente obtida por meio de sua modelagem e otimização. O uso da metodologia de otimização uma variável por vez é obsoleta, oneroso e as interações entre outras variáveis do processo não podem ser avaliadas.

Desta forma, a metodologia de superfície de resposta consiste em uma excelente alternativa, visto que possibilita avaliar os efeitos sinérgicos e antagônicos entre as variáveis do processo. Além disso, reduz a quantidade de ensaios necessários para fornecer informações suficientes e resultados estatisticamente aceitáveis. Esta metodologia já foi aplicada em diversas áreas do conhecimento, contudo nenhum estudo foi encontrado sobre o seu emprego na coagulação de águas superficiais empregando *Guazuma ulmifolia*.

A casca da *Guazuma ulmifolia*, árvore conhecida popularmente como mutamba, é empregada tradicionalmente como agente de clarificação no processo de produção de rapadura. A sua aplicação recorrente em processos de clarificação desperta a curiosidade para que esta seja utilizada em outras áreas, como tratamento de água. Contudo, ainda são escassos os trabalhos acerca do potencial da casca desta árvore como coagulante.

Assim sendo, no presente trabalho buscou-se de maneira inovadora avaliar o emprego da casca da mutamba como coagulante auxiliar ao sulfato de alumínio para tratar água sintética por meio da metodologia de superfície de resposta.

OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Otimizar o processo de coagulação/floculação empregando o extrato de mutamba como coagulante auxiliar ao sulfato de alumínio no tratamento de água para abastecimento.

1.1.2 Objetivos específicos

- i. Revisar a literatura dos últimos vinte anos quando polímeros naturais foram empregados como auxiliar de coagulação no tratamento de água;
- ii. Avaliar o efeito dos fatores pH, dose de coagulante principal e dose de coagulante auxiliar na remoção de turbidez;
- iii. Determinar as condições ótimas para que a turbidez removida atenda o limite estabelecido pelo órgão regulador;
- iv. Caracterizar a mutamba por meio da análise do potencial zeta com a finalidade de avaliar os possíveis mecanismos predominantes no processo de coagulação.

2. REVISÃO: USO DE POLÍMEROS NATURAIS COMO COAGULANTES AUXILIARES NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

INTRODUÇÃO

A qualidade da água nos corpos hídricos tem sido motivo de preocupação global à medida que há aumento indiscriminado das diversas atividades antropogênicas. Desta forma, a sua disponibilidade, em quantidade e qualidade, se tornou um dos objetivos do milênio aspirados pela cúpula da Organização Mundial de Saúde (OMS) (Lima Júnior e Abreu, 2018). Portanto, tratar água de maneira eficiente considerando os custos e o meio ambiente é imperativo.

O processo de coagulação/floculação é o mais comumente empregado para separação sólido-líquido em razão do custo benefício e facilidade de operação quando comparado com as outras tecnologias disponíveis, como filtração por membranas e oxidação-redução (Lim et al., 2018). No entanto, este processo precisa ser controlado de forma eficiente, do contrário, a formação de flocos será menor e estes serão mais suscetíveis ao cisalhamento o que impacta negativamente nos processos subsequentes (Lee et al., 2014; Yang et al., 2016).

Os coagulantes auxiliares são amplamente empregados visto que aumentam a eficiência de remoção de partículas coloidais pela formação de flocos maiores e mais resistentes. Os coagulantes auxiliares mais utilizados são os sintéticos, contudo estes apresentam a desvantagem de não serem biodegradáveis, além de liberarem monômeros residuais tóxicos na água tratada e no lodo. Alguns exemplos de polímeros sintéticos são as poli-acrilamidas, ácidos poli-acrílicos, ácidos poliestireno sulfônico e seus derivados (Brostow et al., 2009; Chakrabarti et al., 2008; Nourani et al., 2016).

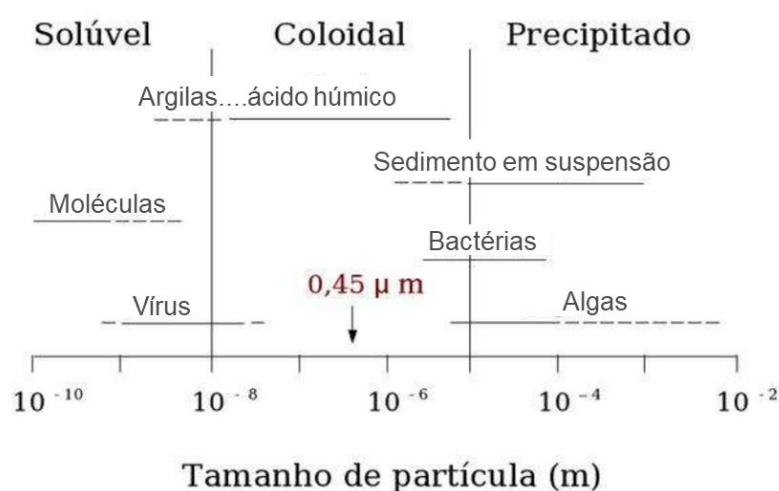
Geralmente, os coagulantes auxiliares são inseridos após 30/60s da adição do coagulante inorgânico, que neste caso é chamado de coagulante principal; visto que, este é o responsável por desestabilizar a suspensão por meio do mecanismo de neutralização de cargas ou varredura (Bratby, 2016).

Visando otimizar a eficiência do processo de coagulação/floculação, diminuir custos e solucionar os problemas destacados anteriormente, os polímeros naturais vêm sendo relatados na literatura como alternativa aos coagulantes sintéticos tradicionais e polímeros orgânicos sintéticos. Embora diversos trabalhos já tenham sido publicados destacando o emprego de coagulantes naturais ou sintéticos no tratamento de água e águas residuárias (Jiang, 2015; Xue et al., 2019a), ainda são escassos estudos acerca do uso de polímeros naturais como auxiliar de coagulação para o tratamento de água para abastecimento. Portanto, o objetivo deste trabalho foi buscar os resultados encontrados em pesquisas conduzidas nos últimos vinte anos quando polímeros naturais foram utilizados como coagulante auxiliar no tratamento de água.

COLÓIDES

As impurezas presentes na água podem apresentar risco à saúde se não forem reduzidas ou eliminadas. A maioria destas impurezas apresentam carga negativa superficial e, portanto, repelem-se, resultando em uma suspensão estável por um longo período de tempo dificultando a sua remoção. Essas impurezas são partículas de natureza coloidal, cujo diâmetro apresenta-se menor do que 10^{-5} mm (Figura 2.1) (VanLoon e Duffy, 2018).

Figura 2.1– Classificação de material comumente presente em águas naturais.



Fonte: Adaptada de (VanLoon e Duffy, 2018).

O tamanho reduzido das partículas coloidais impossibilita a remoção exclusivamente por sedimentação. Por isso, a coagulação/floculação é a prática

mais comum para removê-las. A coagulação pode ser definida como a etapa responsável por desestabilizar as partículas constituintes de uma dada suspensão. Já na floculação, as partículas já desestabilizadas são induzidas a formar agregados, ou seja, flocos (Bratby, 2016).

A origem das cargas superficiais das partículas coloidais está associada a três fenômenos distintos. O primeiro, está relacionado com a presença de grupamentos funcionais do tipo hidroxila ou carboxila que ao dissociarem-se na solução aquosa, a depender do grau de ionização e do pH do meio, produzem carga elétrica. Em meio ácido as cargas superficiais positivas prevalecem, enquanto que em meio básico as cargas superficiais negativas predominam. O segundo, está associado a adsorção de íons específicos na superfície da partícula decorrentes de forças de van der Waals e ligações de hidrogênio. O terceiro, está relacionado com imperfeições do cristal ou à substituição do átomo por outros de menor valência na estrutura do cristal (Bratby, 2016; Libânio, 2015).

MECANISMOS DE DESESTABILIZAÇÃO DE PARTÍCULAS COLOIDAIS

A desestabilização de partículas coloidais, coagulação, é obtida pela redução das forças de repulsão entre as partículas com cargas negativas; isto acontece quando um produto químico apropriado é adicionado, tradicionalmente, sais de ferro ou de alumínio, seguido por agitação rápida para homogeneização da mistura. Estes coagulantes inorgânicos são muito eficientes devido a sua capacidade de formar complexos polinucleares que apresentam cargas múltiplas com características aprimoradas de adsorção, sendo a natureza da carga destes complexos controlada pelo pH do meio (Bratby, 2016).

Os principais mecanismos responsáveis pela coagulação são: compressão da camada difusa; adsorção-neutralização de cargas; varredura; e adsorção-formação de pontes.

2.1.1 Compressão da camada difusa

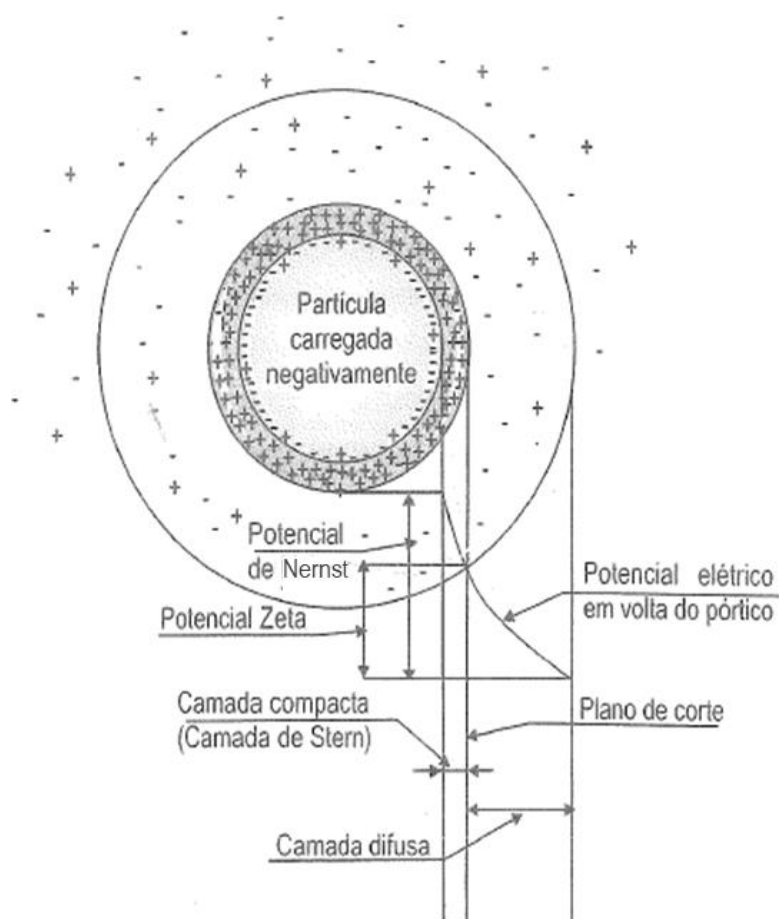
A dupla camada difusa é formada por contra-íons (íons positivos) adicionais, que são atraídos pelo colóide negativo, estes por sua vez são

repelidos pela camada de Stern, e com outros íons negativos estabelecendo um equilíbrio dinâmico (Figura 2.2).

A compressão da camada difusa ocorre por meio da adição de um eletrólito na solução coloidal, que por sua vez, aumenta a concentração de cargas e, conseqüentemente reduz a esfera de influência das partículas, diminuindo desta forma o potencial zeta. Quando a quantidade de eletrólitos empregada é adequada pode ocorrer então a coagulação, embora não necessariamente ocorra a neutralização das cargas (Bratby, 2016; Di Bernardo et al., 2017).

Um ponto relevante sobre este mecanismo é que independentemente da quantidade de eletrólitos utilizada, a reestabilização da carga dos colóides não é alcançada. Além disso, há pouca dependência entre a concentração de colóides na água e a quantidade de eletrólitos necessária para que a coagulação ocorra (Di Bernardo et al., 2017).

Figura 2.2– Modelo da dupla camada difusa.



Fonte: (O' Melia, 1969 apud Libânio, 2015)

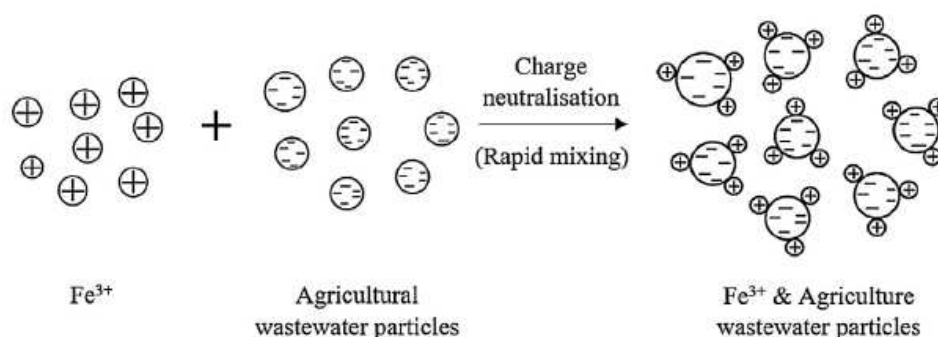
2.1.2 Adsorção-neutralização de cargas

Algumas espécies químicas apresentam a capacidade de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais; quando isto acontece partículas coloidais e espécies químicas de cargas contrárias interagem e se desestabilizam. As interações neste tipo de mecanismo ocorrem entre coagulante-colóide e coagulante / solvente ao passo que o coagulante é adicionado na dispersão coloidal (Bratby, 2016; Santos et al., 2007).

Esse mecanismo transcorre quando o coagulante é empregado em dosagens muito inferiores às do mecanismo por compressão da camada difusa. Ademais, diferentemente do mecanismo supracitado, há uma relação estequiométrica entre a concentração de colóides e a quantidade de eletrólitos necessária para que ocorra a desestabilização por adsorção (Figura 2.3). Ainda, a reversão das cargas superficiais das partículas por meio da superdosagem de espécies adsorvíveis pode acontecer (Libânio, 2015).

A adsorção-neutralização é comumente utilizada em tecnologias de tratamento simplificadas, ou seja, que incluem a coagulação e filtração direta como etapas do processo. Portanto, não há necessidade de formar flocos grandes e sim, de desestabilizar as partículas para que estas fiquem retidas nos filtros de forma eficiente (Santos et al., 2007).

Figura 2.3– Esquema do mecanismo de neutralização de cargas por meio de íons de ferro (III).



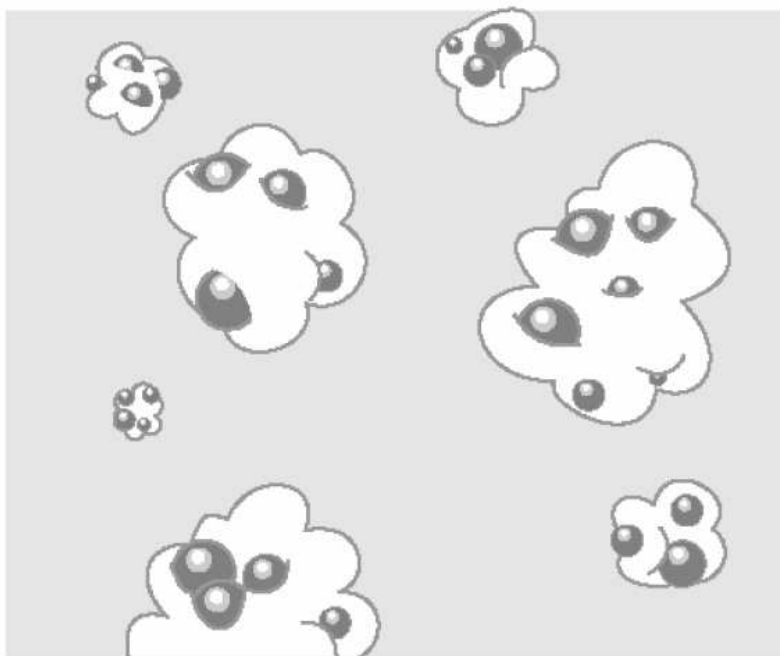
Fonte: (Lim et al., 2018)

2.1.3 Varredura

No mecanismo de varredura os sais metálicos precipitam dando origem aos hidróxidos de ferro ou alumínio que por sua vez aglutinam as partículas disponíveis no meio à medida que se movem, dando origem a flocos maiores. Esta prática ocorre em faixas determinadas de pH (6-8) e são empregadas doses mais elevadas de coagulante quando comparado ao mecanismo de adsorção/neutralização de cargas (Libânio, 2015).

Este tipo de mecanismo dá origem a flocos maiores do que aqueles formados por adsorção/neutralização de cargas; por conseguinte, as velocidades de sedimentação são maiores. Normalmente, esta técnica é empregada nas estações de tratamento de água convencionais, que incluem como etapas de tratamento: coagulação, floculação, decantação (Libânio, 2015; Santos et al., 2007).

Figura 2.4 – Mecanismo de coagulação por varredura.



Fonte: (Ravina, 1993)

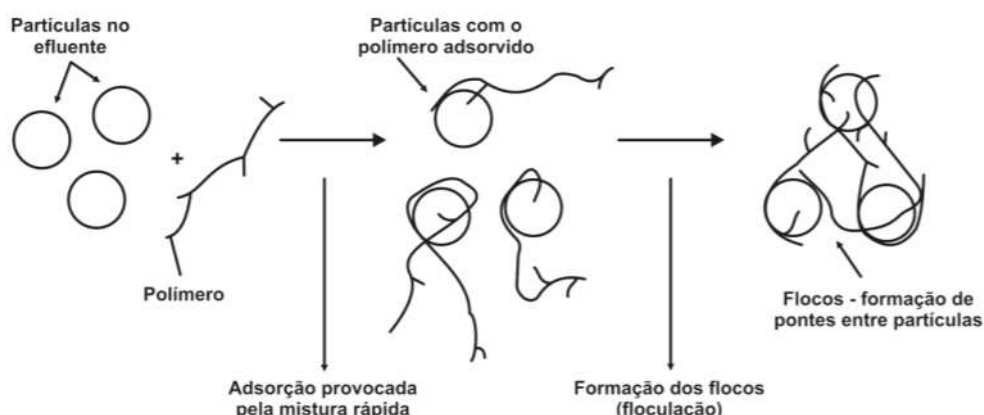
2.1.4 Adsorção-formação de pontes

Os polímeros podem ser classificados quanto as cargas, podendo ser: catiônicos (possuem sítios ionizáveis positivos), aniônicos (possuem sítios ionizáveis negativos), não iônicos (não possuem sítios ionizáveis) e anfóteros

(possuem sítios ionizáveis positivos e negativos). Todos apresentam longas cadeias orgânicas, que são resultado da união repetitiva de unidades químicas por meio de ligações covalentes (Bratby, 2016).

Devido as características supracitadas, os polímeros podem adsorver em suas diversas cadeias as partículas coloidais em suspensão e formar pontes (ligações químicas) (Figura 2.5). Porém, para que este mecanismo ocorra é necessário que a molécula do polímero sejam longa o suficiente para que o efeito de repulsão da dupla camada possa ser reduzido. Ademais, para este tipo de mecanismo a dosagem ótima de polímero está relacionada diretamente com a área superficial das partículas coloidais e, a coagulação não necessariamente acontece quando o potencial zeta é nulo (Libânio, 2015).

Figura 2.5 – Mecanismo de adsorção e formação de pontes (ligações).



Fonte: Adaptada de (Metcalf & Eddy, 2003).

FATORES QUE INFLUENCIAM NA COAGULAÇÃO/ FLOCULAÇÃO

Há diversos fatores que influenciam a eficiência do processo de coagulação / floculação, podendo-se destacar: característica do efluente, natureza do coagulante, dose de coagulante e floculante, tempo e gradiente de velocidade de mistura rápida, pH inicial do meio, tempo de sedimentação, temperatura, tempo e gradiente de velocidade da mistura lenta (Bratby, 2016).

Dentre esses fatores os mais intervenientes no processo são: a natureza do coagulante, o pH, alcalinidade da água bruta, a natureza e a distribuição das

partículas que causam cor e turbidez, e a uniformidade de aplicação (Libânio, 2015).

Entre os parâmetros que estão frequentemente associados a potabilidade da água internacionalmente, pode-se destacar a turbidez (uT) e a cor verdadeira (uH), resultantes das impurezas presentes na água. A predominância de uma outra característica (turbidez / cor) irá influenciar no processo de coagulação/floculação, tanto na dosagem como no pH (Libânio, 2015).

A remoção de cor e turbidez requerem abordagens distintas, visto que a redução de cor na água bruta é favorecida pelo meio ácido e a turbidez pelo meio mais básico. A escolha da abordagem está então pautada nas características mais preponderantes da água bruta, por exemplo elevada turbidez e cor baixa (Libânio, 2015).

O pH como já foi mencionado anteriormente é uma das variáveis mais importantes para o controle eficiente do processo de coagulação-floculação, visto que este influencia na solubilidade do coagulante, na carga superficial dos colóides, na carga das espécies do coagulante, entre outros. É também por meio do ajuste do pH que um mecanismo de coagulação pode ser mais preponderante do que outro. Desta forma, a escolha inadequada do pH de coagulação pode ocasionar o fenômeno de reestabilização da suspensão (Lima et al., 2007).

Além do pH, a escolha equivocada da velocidade de mistura lenta, por exemplo, pode ocasionar a quebra dos flocos que terão dificuldade em sedimentar, conseqüentemente corrobora para um tratamento insatisfatório com remoção de turbidez e cor ineficiente. A otimização destes fatores pode trazer como vantagens a diminuição na dosagem dos coagulantes, por conseguinte redução do lodo gerado (Lin et al., 2017).

As variáveis dose e pH estão diretamente relacionadas com o sucesso do processo de coagulação / floculação, visto que a depender do mecanismo de coagulação desejado uma dose baixa pode ser ineficiente para neutralizar as cargas das partículas coloidais. Assim como, uma elevada dose pode resultar em reestabilização da suspensão, devido aos sítios dos colóides já estarem preenchidos (Yamamura et al., 2019).

COAGULANTES

O uso de agentes coagulantes para a clarificação da água é praticado desde os tempos antigos, já no Egito em 2000 a.C., onde sementes amassadas eram os materiais mais comumente relatados. Embora existam histórias do uso de polímeros naturais no tratamento de água antes mesmo dos coagulantes metálicos, detalhes sobre o seu funcionamento e mecanismos de atuação ainda não são totalmente compreendidos, o que faz com que estes não sejam empregados na maioria das vezes nas estações de tratamento de água (ETA) e na indústria (Bazrafshan et al., 2015). Além disso, estes não são tão eficientes para tratar águas com baixa turbidez, podem acarretar em aumento no carbono orgânico dissolvido (COD) e, ainda são escassas avaliações econômicas da aplicação de polímeros naturais em escala plena (Asrafuzzaman et al., 2011; Buenaño et al., 2019; Saleem and Bachmann, 2019).

Os coagulantes metálicos são tradicionalmente os mais utilizados nas ETAs, destacando-se o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. Embora esses sais sejam amplamente empregados, eles apresentam algumas desvantagens, como: corrosão em tubulações quando doses mais elevadas de sais de ferro são ministradas; custo relativamente alto; e efeitos adversos à saúde no caso dos sais de alumínio (Guo et al., 2015).

Especificamente sobre os sais de alumínio, há a geração de um lodo de difícil disposição, alteração do pH da água tratada, além de baixa eficiência quando aplicado em regiões frias. Portanto, os coagulantes auxiliares são amplamente empregados para aumentar a eficiência de remoção de partículas coloidais de efluentes (Nourani et al., 2016).

Os coagulantes auxiliares mais empregados ainda são os de origem sintética e estes apresentam alguns pontos negativos: não são biodegradáveis, apresentam alto custo e liberam monômeros residuais na água (Brostow et al., 2009; Chakrabarti et al., 2008; Ferasat et al., 2020). Por essas razões, os polímeros naturais têm sido avaliados na literatura como coagulantes auxiliares aos sais metálicos e polímeros sintéticos e têm apresentado resultados promissores que serão relatados neste trabalho.

POLÍMEROS NATURAIS COMO AUXILIARES DE COAGULAÇÃO

Desde o final da década de 1950 nos EUA, os polímeros orgânicos naturais e sintéticos eram aplicados como auxiliares de coagulação, com a finalidade de reduzir as dosagens do coagulante principal e conferir aos flocos mais densidade (Libânio, 2015).

De acordo com Libânio (2015), a controvérsia quanto a denominação exata de auxiliar de coagulação, floculação ou filtração se dá devido a distinção quanto ao ponto de aplicação do produto, contudo a função primordial permanece a mesma que é propiciar a aglutinação dos flocos e conferir-lhes maior resistência a ruptura.

Os estudos acerca da utilização de polímeros naturais no tratamento de água ganharam muito interesse ao longo das últimas décadas, devido as vantagens que estes apresentam: baixa toxicidade, biodegradabilidade e considerável facilidade na disponibilidade no meio ambiente (Ferasat et al., 2020; Xue et al., 2019a).

Além das vantagens supracitadas, pode-se destacar que muitos dos polímeros naturais fazem parte da alimentação humana em muitos países, consequentemente o risco associado ao seu emprego em relação à saúde humana a longo prazo é considerado muito pequeno. Em oposição, o emprego de polímeros sintéticos gera preocupação devido aos monômeros de acrilamida no residual da água tratada (Lima et al., 2007).

Desta forma, pesquisas foram realizadas sobre o emprego de polímeros naturais como auxiliares de coagulação no tratamento de água. Contudo, são escassas as revisões que reúnam as informações mais relevantes sobre o tópico. Por isso, na tabela 2.1 resumem-se 20 estudos que foram conduzidos no período de 2002–2019 que reúnem as seguintes características em comum: aplicação de um polímero natural como coagulante auxiliar a sais metálicos e o tipo de suspensão (água sintética ou água superficial). Além disso, de forma a facilitar trabalhos futuros estão sintetizados os parâmetros de projeto empregados, como velocidade de mistura rápida e tempo de mistura rápida.

Tabela 2.1 – Estudos sobre polímeros naturais como coagulantes auxiliares para tratamento de água.

Referência	Coagulante auxiliar	Coagulante principal	Objetivo	Turbidez inicial (UNT)	Tipo de suspensão	Velocidade de mistura rápida e tempo de mistura rápida	Velocidade de mistura lenta e tempo de mistura lenta	Tempo de sedimentação	Dose de coagulante principal, dose de coagulante auxiliar e pH reportados como adequados
(Zhang et al., 2018)	Quitosana	PAC	Alumínio residual dentro dos limites	2,4	Água superficial (baixa temperatura)	80 RPM por 7 min	25 RPM por 7 min	30 min	5 mg/L de Al ₂ O ₃ , 1mg/L e pH 7
(Huang et al., 2015)	Composto biofloculante (CBF)	PAC	Remover turbidez, cor, COD e avaliar flocos	2,5	Água superficial	200 RPM por 1 min	40 RPM por 15 min	30 min	10 mg/L, 2 mg/L e pH 8,4
(Buenaño et al., 2019)	Amido de casca de banana verde	Sulfato de alumínio	Remover turbidez	5,32	Água superficial	100 RPM por 1 min	40 RPM por 20 min	30 min	50 mg/L, 0,2 mg/L e pH 7,88
(Zemmouri et al., 2012)	Quitosana	Sulfato de alumínio	Remover turbidez	7,81	Água superficial	200 RPM por 3 min	40 RPM por 20 min	45 min	40 mg/L, 0,2 mg/L e pH 8,1
(Bo et al., 2011)	Composto biofloculante (CBF)	Sulfato de alumínio	Remover turbidez, matéria orgânica e avaliar flocos	15	Água sintética com matéria orgânica	200 RPM por 1 min	40 RPM por 15 min	30 min	7 mg/L de Al, 2 mg/L e pH 8,32
(Zhao et al., 2013)	Extrato de enteromorpha	Sulfato de alumínio	Remover matéria orgânica natural e avaliar os flocos	15	Água sintética com matéria orgânica	200 RPM por 1,5 min	40 RPM por 15 min	30 min	5 mg/L, 0,1 mL e pH 6
(Gupta and Ako, 2005)	Goma de guar	Sulfato de alumínio	Remover turbidez e bactérias	26,5	Água superficial	250 RPM por 8 min/ 70 RPM por 10 min	40 RPM por 10 min	10 min	44, 97 mg/L, 1,80 mg/L e pH 5,79
(Pramod et al., 2002)	Semente de nirmali e milho	Sulfato de alumínio	Remover turbidez	100	Água sintética	100 RPM por 2 min	25 RPM por 8 min	30 min	25 mg/L, 15 mg/L e pH 8
(Özacar and Şengil, 2003)	Tanino (Valonia)	Sulfato de alumínio	Remover turbidez	100	Água sintética (caulim)	200 RPM por 1 min	45 RPM por 30 min	15 min	3 mg/L de Al ⁺³ , 1 mg/L e pH 7

(Oladoja and Aliu, 2008)	Extrato de casca de banana	Sulfato de alumínio (100g /L)	Remover turbidez em meio ácido	100	Água sintética (caulim)	200 RPM por 2 min	45 RPM por 20 min	20 min	0,5 mL/L, 0,5 mL/L e pH 4
(Mehdinejad et al., 2009)	Quitosana	Sulfato de alumínio	Remover turbidez e bactérias	100	Água sintética (Caulim)	100 RPM por 1 min	40 RPM por 7,5 min / 20 RPM por 7,5 min	20 min	5 mg/L, 0,5 mg/L e pH 7-7,5
(Khalil et al., 2016)	Caruru da bahia (COL)	Sulfato de alumínio	Remover turbidez e avaliar tempo de sedimentação	100	Água sintética (Caulim)	250 RPM por 1 min	50 RPM por 20 min	40 min	300 mg/L, 3 mg/L e pH 7,5
(Bazrafshan et al., 2015)	Pistache - extrato da semente com NaCl 0,5%	Cloreto de ferro	Remover turbidez	100	Água sintética (Caulim)	100 RPM por 4 min	30 RPM por 15 min	30 min	10 mg/L, 0,4 mL/L e pH 9
(Mehdinejad and Bina, 2018)	Semente de moringa	Sulfato de alumínio	Remover turbidez	100-120	Água sintética (Caulim)	100 RPM por 2 min	40 RPM por 15 min	30 min	15 mg/L, 5mg/L e pH 7-7,5
(Jadhava and Mahajan, 2013)	Mucilagem dos frutos de Coccinia indica (kundru)	Sulfato de alumínio	Remover turbidez	146,4	Água sintética	100 RPM por 1 min	30 RPM por 30 min	30 min	5 mg/L, 0,3 mg/L e pH 7
(Choy et al., 2016)	Amido de arroz	Sulfato de alumínio	Remover turbidez e avaliar flocos	165	Água sintética (Caulim)	100 RPM por 2 min	40 RPM por 20 min	30 min	12 mg/L, 0,21 mg/L e pH 4
(Choy et al., 2016)	Amido de semente de jaca	Sulfato de alumínio	Remover turbidez	165	Água sintética (Caulim)	100 RPM por 2 min	40 RPM por 20 min	30 min	2,1 mg/L, 60 mg/L e pH 6
(Lim et al., 2018)	Mucilagem de agrião de jardim	Cloreto de ferro	Remover turbidez	400	Água sintética (Caulim)	150 RPM por 1 min	30 RPM por 20 min	20 min	9,4 mg/L de Fe+3, 2,8 mg/L e pH 6
(Nourani et al., 2016)	Algodão (CS)	Sulfato de alumínio	Remover turbidez e avaliar os flocos	-	Água sintética (Caulim)	180 RPM por 3 min	40 RPM por 15 min	30 min	23,1 mg/L, 7,2 mg/L e pH 6,2
(Harfouchi et al., 2016)	Escama de peixe em pó	Sulfato de alumínio	Remover matéria orgânica natural	-	Água sintética com matéria orgânica	250 RPM por 2 min	67,02 RPM por 30 min	30 min	1,09 mg/L, 1,13 mg e pH 5

Pela Tabela 2.1, observa-se que a maioria dos estudos objetivou avaliar a capacidade do coagulante auxiliar testado em melhorar a remoção de turbidez. Embora os coagulantes auxiliares possam ser também utilizados com o objetivo de melhorar os flocos formados, somente seis dos vinte trabalhos avaliados investigaram os mesmos.

Percebe-se pela Tabela 2.1 que a faixa de turbidez inicial utilizada pelos estudos é bem ampla, o que pode dificultar na comparação entre os resultados. Águas com baixa turbidez inicial são mais difíceis de serem tratadas, pois a quantidade de partículas em suspensão é menor e estas por sua vez apresentam maior dificuldade para colidir e posteriormente, agregar-se (Liu et al., 2019). Desta forma, para facilitar a apreciação dos resultados, os estudos foram agrupados por faixa de turbidez (baixa, média e alta).

Observa-se pela Tabela 2.1 que para a faixa de turbidez baixa (2,5~ 26,5 UNT) o extrato de enteromorpha teve o melhor desempenho como auxiliar de coagulação quanto ao emprego da menor dose de coagulante inorgânico (Zhao et al., 2013). Já para a faixa de média turbidez (65 ~ 100 UNT) pode-se perceber que os coagulantes auxiliares que permitiram reduzir mais a dose de sulfato de alumínio empregada foram a quitosana e mucilagem de *C. indica* (Mehdinejad et al., 2009; Jadhava e Mahajan, 2013).

A maioria dos estudos avaliados emprega água sintética no lugar de água superficial. Isto faz com que os estudos possam ser comparados com mais facilidade, já que as características do meio de dispersão, como matéria orgânica natural, podem interferir na dinâmica de remoção de turbidez e cor pelo processo de coagulação / floculação (Tabela 2.1).

Pela Tabela 2.1 observa-se que em testes de coagulação/floculação, usualmente são escolhidos velocidade de mistura rápida na ordem de 80 a 250 RPM. Enquanto que, o tempo de mistura rápida gira em torno de 30 s a 10 min. Já para a velocidade de mistura lenta pode variar entre 30 a 50 RPM, enquanto o tempo de mistura lenta situa-se entre 10 e 30 min. Para o tempo de sedimentação o mais usual é de 30 min, porém pode oscilar entre 10 e 80 min.

O sulfato de alumínio é o coagulante principal mais escolhido pelos estudos. Essa opção pode ser explicada por ser, tradicionalmente, o coagulante

mais utilizado pelas estações de tratamento. Ademais, apresenta ótima eficiência para a maioria das águas superficiais (Lima et al., 2007).

A maioria dos estudos supracitados realiza otimização das doses de coagulante principal e auxiliar fixando um fator com a finalidade de encontrar o valor ótimo para o segundo. Porém, esta estratégia pode levar a um “falso” ótimo, visto que desconsidera a interação entre as variáveis. Além disso, muitas vezes o pH é fixado com base em estudos anteriores, ignorando que o coagulante auxiliar possa funcionar melhor em uma faixa de pH diferente do que foi anteriormente testado para o coagulante principal.

CONSIDERAÇÕES E PESQUISAS FUTURAS

Um dos fatores mais relevantes ao empregar um coagulante auxiliar é reduzir a dose do coagulante principal. Com isso, o residual deste componente será menor tanto na água tratada como no lodo gerado.

É importante que estudos sejam feitos para avaliar economicamente a aplicação destes polímeros e não só tecnicamente.

Além disso, é interessante que mais trabalhos empregando a metodologia de superfície de resposta sejam conduzidos para que as interações entre as variáveis estudadas possam ser melhor compreendidas.

2.8 REFERÊNCIAS

- Al-hamadani, Y. A. J., Yusoff, M. S., Umar, M., & Bashir, M. J. K. (2011). Application of psyllium husk as coagulant and coagulant aid in semi-aerobic landfill leachate treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3), 582–587. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.087>
- Antov, M. G., Šć, M. B., Prodanovi, J. M., Kuki, D. V, Vasi, V. M., Tatjana, R. Đ., & Milo, M. M. (2018). Common oak (*Quercus robur*) acorn as a source of

- natural coagulants for water turbidity removal, 117, 340–346. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.022>
- Asrafuzzaman, M., Fakhruddin, A. N. ., & Hossain, M. A. (2011). Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants. *International Scholarly Research Network*, 2011, 6. <https://doi.org/10.5402/2011/632189>
- Bazrafshan, E., Mostafapour, F. K., Ahmadabadi, M., & Mahvi, A. H. (2015). Turbidity removal from aqueous environments by *Pistacia atlantica* (Baneh) seed extract as a natural organic coagulant aid. *Desalination and Water Treatment*, 56(4), 977–983. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.942704>
- Bo, X., Gao, B., Peng, N., Wang, Y., Yue, Q., & Zhao, Y. (2011). Coagulation performance and floc properties of compound bioflocculant-aluminum sulfate dual-coagulant in treating caulim-humic acid solution. *Chemical Engineering Journal*, 173(2), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.077>
- Bo, X., Gao, B., Peng, N., Wang, Y., Yue, Q., & Zhao, Y. (2012). Effect of dosing sequence and solution pH on floc properties of the compound bioflocculant-aluminum sulfate dual-coagulant in caulim-humic acid solution treatment. *Bioresource Technology*, 113, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.029>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (3rd ed.). IWA.
- Brostow, W., Lobland, H. E. H., Pal, S., & Singh, R. P. (2009). Polymeric flocculants for wastewater and industrial effluent treatment, 31, 157–166.
- Buenaño, B., Vera, E., & Aldás, M. B. (2019). Study of coagulating / flocculating characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment. *Ingeniería e Investigación*, 2019 (Vol. 39, N. 1). <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n1.69703>
- Carvalho, P. E. R. (2007). *Mutamba Guazuma ulmifolia*. Colombo.
- Chakrabarti, S., Banerjee, S., & Chaudhuri, B. (2008). Application of biodegradable natural polymers for flocculated sedimentation of clay slurry, 99, 3313–3317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.049>

- Choy, S. Y., Murthy, K., Prasad, N., & Wu, T. Y. (2016). Isolation , characterization and the potential use of starch from jackfruit seed wastes as a coagulant aid for treatment of turbid water. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8024-z>
- Di Bernanrdo, L., Dantas Di Bernardo, Â., & Nogueira Voltan, P. E. (2017). *Métodos e técnicas de tratamento de água* (3rd ed.). São Carlos: LDiBe.
- Ferasat, Z., Panahi, R., & Mokhtarani, B. (2020). Natural polymer matrix as safe flocculant to remove turbidity from caulim suspension : Performance and governing mechanism. *Journal of Environmental Management*, 255(May 2019), 109939. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109939>
- Feria-Díaz, J., Rodiño-Arguello, J., & Gutiérrez-Ribon, G. (2016). Behavior of turbidity, pH, alkalinity and color in Sinú River raw water treated by natural coagulants. *Revista Facultad de Ingeniería*, 78, 119–128. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n78a16>
- Gao, B., Chu, Y., Yue, Q., Wang, B., & Wang, S. (2005). Characterization and coagulation of a polyaluminum chloride (PAC) coagulant with high Al 13 content. *Journal of Environmental Management*, 76, 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.12.006>
- Guo, B., Yu, H., Gao, B., Rong, H., Dong, H., Ma, D., ... Zhao, S. (2015). Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate with cationic polyamidine as coagulant aid for caulim-humic acid treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 481, 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.06.017>
- Jiang, J. Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>
- Jones, A. N., & Bridgeman, J. (2016). Investigating the characteristic strength of flocs formed from crude and purified Hibiscus extracts in water treatment. *Water Research*, 103, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.019>
- Jones, B. (2017). The Earth's population is going to reach 9.8 billion by 2050. Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2017/08/the-earths->

population-is-going-to-reach-9-8-billion-by-2050?utm7

- Katrivesis, F. K., Karela, A. D., Papadakis, V. G., & Paraskeva, C. A. (2019). Revisiting of coagulation-flocculation processes in the production of potable water. *Journal of Water Process Engineering*, 27(December 2018), 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.007>
- Lee, C. S., Robinson, J., & Chong, M. F. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment Author: *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.010>
- Libânio, M. (2015). *Fundamentos de qualidade e tratamento de água* (4rd ed.). Átomo.
- Lim, B., Lim, J., & Ho, Y. (2018). Garden Cress Mucilage as A Potential Emerging Biopolymer for Improving Turbidity Removal in Water Treatment. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.015>
- Lima, G. J. de A., Giordano, G., & Filho, O. B. (2007). Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto. Universidade Estadual do Rio de Janeiro.
- Lima Júnior, R. ., & Abreu, F. O. M. . (2018). Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Flocculantes para Tratamento de Águas : Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades. *Revista Virtual de Química*, 10(3). <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180052>
- Lin, J., Couperthwaite, S. J., & Millar, G. J. (2017). Effectiveness of aluminium based coagulants for pre-treatment of coal seam water. *Separation and Purification Technology*, 177, 207–222. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.010>
- Liu, Z., Wei, H., Li, A., & Yang, H. (2019). Enhanced coagulation of low-turbidity micro-polluted surface water: Properties and optimization. *Journal of Environmental Management*, 233(November 2018), 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.101>
- Mehdinejad, M., Bina, B., Nikaeen, M., & Attar, H. (2009). Effectiveness of

- chitosan as natural coagulant aid in treating turbid waters. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(4), 845–850.
- Mehdinejad, M. H., & Bina, B. (2018). Application of *Moringa oleifera* coagulant protein as natural coagulant aid with alum for removal of heavy metals from raw water. *Desalination and Water Treatment*, 116, 187–194. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22546>
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mohammadi, A. S., Faradmal, J., Hoseinzadeh, E., & Asgari, G. (2018). Removal of Turbidity and Humic Acids Using Chitosan As a Coagulant Aid: Modeling With Artificial Neural Network. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(1), 31–38. <https://doi.org/10.30638/eemj.2017.004>
- Muthuraman, G., & Sasikala, S. (2014). Journal of Industrial and Engineering Chemistry Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants, 8–12.
- Muyibi, S. A., & Alfugara, A. M. S. (2003). Treatment of surface water with *Moringa oleifera* seed extract and alum - A comparative study using a pilot scale water treatment plant. *International Journal of Environmental Studies*, 60(6), 617–626. <https://doi.org/10.1080/723032000087925>
- Naik, S. S., & Setty, Y. P. (2014). Optimization of parameters using response surface methodology and genetic algorithm for biological denitrification of wastewater, 823–830. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0266-4>
- Nourani, M., Baghdadi, M., Javan, M., & Bidhendi, G. N. (2016). Production of a biodegradable flocculant from cotton and evaluation of its performance in coagulation-flocculation of caulim clay suspension: Optimization through response surface methodology (RSM). *Biochemical Pharmacology*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.028>
- Priya, T., Tarafdar, A., Gupta, B., & Mishra, B. K. (2017). Effect of bioflocculants on the coagulation activity of alum for removal of trihalomethane precursors from low turbid water. *Journal of Environmental Sciences*, 70, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.09.019>

- Ravina, L. (1993). *Everything you want to know about Coagulation & Flocculation* (4th ed.). Virginia: Zeta-Meter, Inc.
- Rodiño-Arguello, J., Feria-Díaz, J., Paternina-Urbe, R., & Marrugo-Negrete, J. (2015). Sinú River raw water treatment by natural, 76, 90–98. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a11>
- Saleem, M., & Bachmann, R. T. (2019). A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 72, 281–297. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.12.029>
- Santos, E., Teixeira, A. R., Almeida, C., Libânio, M., & Pádua, V. L. (2007). Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12(4), 361–370.
- Jadhava, M., & Mahajan, Y. (2013). A comparative study of natural coagulants in flocculation of local clay suspensions of varied turbidities. *Journal Civil Engineering and Technology*, 26–39.
- VanLoon, G., & Duffy, S. (2018). *Environmental Chemistry - A global perspective* (4th ed.). Oxford.
- World agroforestry center - guazuma ulmifolia. (2019). Retrieved December 15, 2019, from <http://old.worldagroforestry.org/treedb2/speciesprofile.php?Spid=944>
- Xue, Y., Liu, Z., Li, A., & Yang, H. (2019a). Application of a green coagulant with PACl in efficient purification of turbid water and its mechanism study. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 81, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.01.015>
- Xue, Y., Liu, Z., Li, A., & Yang, H. (2019b). Application of a green coagulant with PACl in efficient purification of turbid water and its mechanism study. *Journal of Environmental Sciences*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.01.015>
- Yamamura, H., Putri, E. U., Kawakami, T., Suzuki, A., Ariesyady, H. D., & Ishii, T. (2019). Dosage optimization of polyaluminum chloride by the application

of convolutional neural network to the floc images captured in jar tests. *Separation and Purification Technology*, 116467. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116467>

Yang, R., Li, H., Huang, M., Yang, H., & Li, A. (2016). A review on chitosan-based flocculants and their applications in water. *Water Research*, 95(2015), 59–89. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.068>

Zhao, S., Gao, B., Li, X., & Dong, M. (2012). Influence of using Enteromorpha extract as a coagulant aid on coagulation behavior and floc characteristics of traditional coagulant in Yellow River water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 200–202, 569–576. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.097>

Zhao, Y. X., Wang, Y., Gao, B. Y., Shon, H. K., Kim, J. H., & Yue, Q. Y. (2012). Coagulation performance evaluation of sodium alginate used as coagulant aid with aluminum sulfate, iron chloride and titanium tetrachloride. *Desalination*, 299, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.026>

3. USO DE *Guazuma ulmifolia* COMO COAGULANTE AUXILIAR NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

INTRODUÇÃO

Espera-se que até 2050 a população terrestre seja de 9,8 bilhões de pessoas. Este aumento populacional em mais de 30% gera preocupação em virtude do potencial de comprometimento dos recursos naturais de maneira geral, sendo a água um dos recursos mais estratégicos e sensíveis. Portanto, torna-se crítica a necessidade de tratar a água de forma eficiente (Jones, 2017).

O processo de coagulação / floculação é amplamente empregado para o tratamento de água para abastecimento com a finalidade de remover sólidos em suspensão e dissolvidos (Katrivesis et al., 2019). Os sais de alumínio, tradicionalmente são os mais utilizados neste processo, devido à fácil obtenção e à eficiência. No entanto, seu uso tem sido questionado em virtude dos efeitos adversos à saúde e da dificuldade de disposição ou aproveitamento do lodo, que é gerado em grande quantidade (Antov et al., 2018).

Uma alternativa para reduzir o alumínio residual na água tratada, e consequentemente mitigar seus efeitos adversos consiste em utilizar polímeros naturais como coagulantes auxiliares, de forma a reduzir a dose de sais de alumínio utilizadas. Além disso, reduzir o lodo gerado e aumentar a velocidade de sedimentação, podendo reduzir assim os custos do processo (Jones et al., 2016; Lim et al., 2018)

Nos últimos anos, os polímeros naturais vêm sido amplamente estudados pela comunidade científica, sendo considerados como alternativa aos coagulantes metálicos e aos polímeros sintéticos (Mehdinejad e Bina 2018; Yang et al. 2016). Dentre os polímeros naturais mais mencionados na literatura destacam-se a *Moringa Oleifera* e a quitosana, apresentando elevada eficiência para remoção de turbidez da água (>80%) (Mohammadi et al, 2018; Muyibi and Alfugara, 2003).

Os polímeros naturais podem ser de fontes vegetais como a *Moringa Oleifera* ou animais como a quitosana. Os flocos formados por polímeros naturais

são maiores e mais resistentes, o que acelera a sedimentação e facilita as etapas subsequentes, como a filtração. Além disso, polímeros naturais destacam-se por sua biodegradabilidade, menor quantidade de lodo gerado e ampla disponibilidade no ambiente. Ademais, quando estes são utilizados em conjunto com os coagulantes metálicos propiciam mecanismos de coagulação combinados, o que melhora a atividade coagulante (Bo et al., 2012; Priya et al., 2017).

A *Guazuma ulmifolia*, conhecida comumente como mutambeira, tem origem na América Latina. O seu extrato mucilaginoso, obtido por cozimento de pedaços do caule, é amplamente utilizado em regiões canavieiras do interior do Brasil para a fabricação artesanal de rapadura, como agente de clarificação do caldo de cana durante a fervura (Carvalho, 2007; “World agroforestry center - guazuma ulmifolia,” 2019).

Na literatura foram encontrados dois estudos que avaliaram o uso da *Guazuma ulmifolia* como coagulante natural reportando eficiências na remoção de turbidez na faixa de 50~70% (Feria-Díaz et al., 2016; Rodiño-Arguello et al., 2015). Estes resultados sugerem que a *Guazuma ulmifolia* apresenta potencial para ser estudada como auxiliar de coagulação, ao passo que eficiências razoáveis foram relatadas, contudo ainda não satisfatórias para ser empregada como coagulante principal (>80%).

Desta forma, este estudo teve como hipótese que o emprego da mutamba como coagulante auxiliar ao sulfato de alumínio possibilita diminuir a dose do coagulante principal. Caso essa hipótese se confirme, será possível tratar água empregando um material de baixo custo, fácil obtenção e biodegradável.

Essa hipótese foi testada por meio da metodologia de superfície de resposta, de modo a otimizar os fatores dose (coagulante principal e auxiliar) e pH. Além disso, foram realizadas análises de caracterização da *G. ulmifolia* por potencial zeta para compreender como este polímero orgânico atua como coagulante auxiliar.

MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Preparo da água sintética

A água sintética utilizada neste estudo foi preparada misturando-se 10 g de caulim em pó em 1 L de água destilada. A suspensão foi misturada sob agitação magnética durante 1 h, e em seguida, deixada em repouso durante 24 h para completa hidratação (Muthuraman e Sasikala, 2014). Posteriormente, a solução foi colocada em um cone Imhoff por 30 min. Finalmente, os primeiros 300 mL localizados na parte inferior do cone foram descartados e os 700 mL remanescentes foram acondicionados em um frasco. Esta solução foi utilizada como solução estoque para o preparo da água sintética bruta empregada em todos os ensaios no *Jar test* (Zhao et al., 2012).

A turbidez inicial imposta para todos os ensaios foi de 80 UNT obtida por meio da adição de 40 mL da solução estoque de caulim em cada cuba. A água sintética foi empregada neste estudo, visto que águas superficiais apresentam vários componentes orgânicos e inorgânicos que podem interferir na dinâmica do processo de coagulação tornando-o ainda mais complexo para uma avaliação de um coagulante auxiliar novo (Xue et al., 2019).

3.1.2 Preparo da solução de sulfato de alumínio

A solução padrão do coagulante principal foi preparada adicionando-se 10 g de sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ – Synth) em 1 L de água destilada (sulfato de alumínio 1% m/V). Esta solução foi submetida à agitação magnética para completa homogeneização (Mehdinejad et al., 2009). Posteriormente, esta foi armazenada em frasco âmbar e mantida sob temperatura ambiente até a sua utilização nos ensaios de coagulação / floculação.

3.1.3 Preparação do extrato de mutamba

As cascas de mutamba foram coletadas na região do norte de Minas Gerais. O material foi levado à estufa com circulação forçada de ar (modelo MA 035 – MARCONI) por 18 h sob 50 °C. Em seguida, as cascas secas foram trituradas em liquidificador doméstico. O material obtido foi peneirado para homogeneização em peneira de 45 mesh como ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

O extrato de mutamba foi preparado adicionando-se 10 g de pó de casca da mutamba em 1 L de solução de NaCl 1% (m/v). A solução foi misturada durante 1 h com uso de agitador magnético, e foi preparada antes da execução dos testes no Jar test a fim de evitar interferências devido ao armazenamento (Feria-Díaz et al., 2016).

Figura 3.1 – Etapas do processo de preparo da mutamba para extração. Em A: local onde foi realizada a coleta da casca de mutamba; em B: casca da mutamba após ser seca em estufa; em C: casca da mutamba sendo triturada; em D: material obtido sendo homogeneizado; em E: produto final empregado para preparo do extrato salino.



Fonte: autor

3.1.4 Ensaio de coagulação/ floculação

O aparelho *jar test* de 6 cubas (Nova Ética, modelo 218 – LDB/06) foi utilizado em todos os ensaios de coagulação/floculação (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). As cubas foram preenchidas com 1,2 L de água sintética, sendo que a turbidez inicial era lida a 3 cm da superfície.

Figura 3.2 – Jar test de 6 cubas utilizado nos ensaios de coagulação- floculação e sedimentação.



Fonte: Nova ética.

Os ajustes de pH foram realizados com a adição de HCl 1 mol.L⁻¹ e NaOH 1 mol.L⁻¹ a fim de se obter os valores de pH desejados. A leitura deste parâmetro foi realizada com um pHmetro (modelo MP-6 – Hach). O coagulante primário, sulfato de alumínio, era adicionado assim que a velocidade de mistura rápida era atingida e o extrato de mutamba era acrescentado após um minuto. As doses de sulfato de alumínio e extrato de mutamba testadas estavam dentro das faixas de 0 a 10 mg.L⁻¹ e 0 a 5 mg.L⁻¹, respectivamente (Muthuraman e Sasikala, 2014). As velocidades de mistura rápida e lenta e os respectivos tempos de mistura foram determinados de acordo com a literatura, (100 rpm, 2min) e (40 rpm, 30 min) (Buenaño et al., 2019; Choy et al., 2016; Jadhava et. al., 2013). O tempo de sedimentação foi de 30 min e na sequência, foi realizada a coleta das amostras para determinação da turbidez final empregando o turbidímetro Orion modelo AQ4500 – ThermoFisher Scientific (Bazrafshan et al., 2015; Mehdinejad et al., 2009). A turbidez removida foi empregada como variável resposta e foi calculada como a turbidez inicial média subtraída da turbidez final para cada ensaio. Todos os ensaios foram conduzidos em ordem aleatória para minimizar o efeito de qualquer variabilidade inexplicável nas respostas observadas devido a erros externos

3.1.5 Planejamento experimental

O delineamento composto central rotacional (DCCR) foi empregado neste experimento. As variáveis independentes foram a dose de sulfato de alumínio, dose de extrato de mutamba e pH.

Os níveis altos e baixos (+1, -1) do delineamento experimental foram determinados por meio de ensaios preliminares e revisão de literatura (Muthuraman e Sasikala, 2014). Já os pontos axiais (+ α , - α) foram calculados com base no número de variáveis independentes ($k=3$), por meio da equação 1. O valor de α representa a distância entre um ponto axial e o ponto central (=0).

$$\alpha = (2^k)^{1/4} = 1,68 \text{ (Equação 1)}$$

O número de ensaios foi obtido por meio da substituição de valores na equação 2.

$$N = 2^k + 2k + n_c \text{ (Equação 2)}$$

Onde k é o número de fatores ($k = 3$) e n_c é um número arbitrário de repetições nos pontos centrais ($n_c = 6$).

Na Tabela 3.1 estão representados os níveis codificados e reais empregados no DCCR.

Tabela 3.1 – Níveis codificados e reais das variáveis independentes no DCCR.

Variáveis	Níveis codificados (α) e níveis reais				
	-1,68	-1	0	+1	+1,68
Dose de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mg.L^{-1})	0	2,03	5	7,97	10
Dose de mutamba (mg.L^{-1})	0	1,01	2,5	3,99	5
pH	5	5,81	7	8,19	9

A turbidez removida foi selecionada como a variável dependente. A variável resposta foi ajustada e o modelo mais adequado foi selecionado com base nos seguintes critérios: falta de ajuste, coeficiente de determinação e coeficiente de determinação ajustado. O programa Minitab foi utilizado para planejar o experimento e realizar a análise estatística dos resultados.

3.1.6 Potencial zeta

O potencial zeta representa uma medida da magnitude das cargas elétricas que cercam as partículas coloidais, ou seja, este resultado permite realizar tanto a caracterização quanto a natureza das cargas do polímero (Libânio, 2015). Consequentemente, pode-se identificar o mecanismo de atuação responsável pela desestabilização das partículas coloidais.

As análises do extrato de mutamba foram conduzidas em triplicata no Laboratório de Embalagens de Alimentos do Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), empregando o aparelho Zetasizer nano- ZS (Figura 3.3.3).

Figura 3.3 – Equipamento utilizado para a análise do potencial zeta.



Fonte: Malvern Instruments

3.1.7 Análise estatística

De modo a realizar a estimativa dos parâmetros estatísticos e avaliar a capacidade preditiva dos modelos matemáticos, efetuou-se a análise de variância dos dados (ANOVA) empregando-se o programa estatístico Minitab. Por meio do Diagrama de Pareto, os efeitos individuais e as interações entre os fatores foram avaliados. A escolha dos modelos foi realizada com base nos seguintes parâmetros de qualidade: significância dos modelos de regressão, falta de ajuste não significativa, coeficiente de determinação, coeficiente de determinação ajustado e desvio padrão dos resíduos (S).

A etapa de otimização foi realizada com o auxílio da ferramenta Otimizador de Resposta, do programa Minitab. A melhor resposta foi determinada selecionando-se a opção alvo e igualando-a à 77 UNT.

A validação do modelo foi realizada por meio de dois ensaios independentes. Em um dos ensaios foram reproduzidas em três cubas as condições do ensaio ótimo. No segundo ensaio, seis combinações de níveis aleatórios das variáveis dependentes foram obtidas, por sorteio.

Os valores de turbidez removida obtidos experimentalmente foram comparados com os valores estimados pelo modelo ajustado. Estes resultados

foram plotados em gráfico de valores preditos *versus* valores ajustados, apresentando-se o intervalo de confiança de 95% com a finalidade de avaliar a capacidade preditiva do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.8 Caracterização do extrato de mutamba

Por meio da análise do potencial zeta conclui-se que a mutamba apresenta características aniônicas, com carga superficial de -31,9 mV. Portanto, o principal mecanismo de atuação na coagulação é por adsorção - formação de pontes.

Ademais, resultado semelhante (-34 mV) foi observado por Huang et al. (2015). Estes autores avaliaram o emprego de um composto biofloculante (CBF) a base de polissacarídeos (90,6%) e proteína (9,4%) como coagulante auxiliar ao cloreto de poli alumínio (PAC) e concluíram que o mecanismo de adsorção e formação de pontes foi o responsável pela desestabilização das partículas na suspensão.

Em um estudo que avaliou o uso de cascas de *Plantago ovata* como auxiliar de coagulação ao sulfato de alumínio para tratar lixiviado de aterro sanitário foi determinado o potencial zeta deste polímero e do coagulante inorgânico, -1,92 mV e +16,5mV respectivamente (Al-hamadani et al., 2011).

A neutralização de cargas e a varredura são os principais mecanismos de desestabilização das partículas para o sulfato de alumínio (Gao et al., 2005). Desta forma, o uso combinado de sulfato de alumínio e extrato de mutamba pode integrar os mecanismos de desestabilização, melhorando a remoção de turbidez na suspensão de água sintética bruta.

3.1.9 Análise da turbidez

Após a realização de um teste de outliers (teste de Grubs por meio do software estatístico Minitab) dois ensaios dos pontos centrais foram removidos. A exclusão de dois ensaios não prejudica a acurácia do modelo, pois a quantidade de pontos centrais no delineamento composto central rotacional é

arbitrária. Os valores codificados e reais do DCCR e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.2.

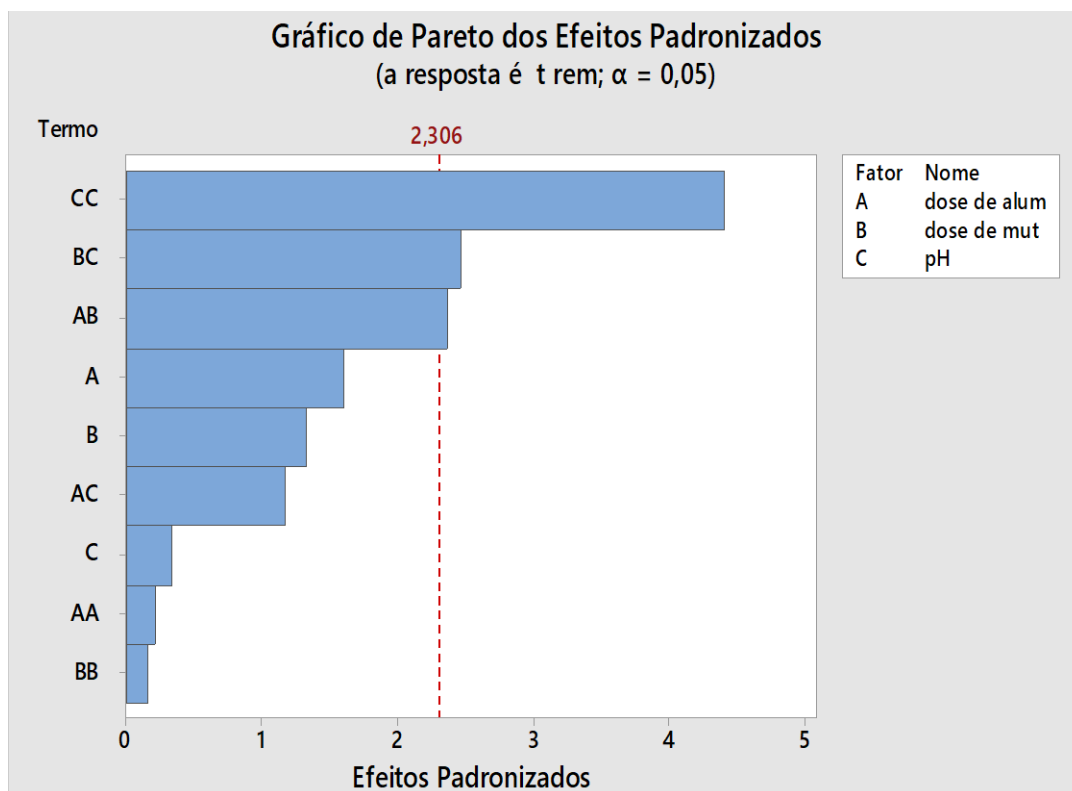
Tabela 3.2 – Valores codificados e reais do DCCR e variável resposta.

Ensaio	Valores codificados			Valores reais			Turbidez removida (UNT)
	Dose de Sulfato de Alumínio	Dose de Mutamba	pH	Dose de Sulfato de Alumínio (mg.L ⁻¹)	Dose de Mutamba (mg.L ⁻¹)	pH	
1	-1	-1	-1	2,03	1,01	5,81	-20,2
2	1	-1	-1	7,97	1,01	5,81	35,7
3	-1	1	-1	2,03	3,99	5,81	39,7
4	1	1	-1	7,97	3,99	5,81	73,9
5	-1	-1	1	2,03	1,01	8,19	15,3
6	1	-1	1	7,97	1,01	8,19	80,8
7	-1	1	1	2,03	3,99	8,19	51,0
8	1	1	1	7,97	3,99	8,19	14,1
9	-1,68	0	0	0,00	2,50	7,00	9,2
10	1,68	0	0	10,00	2,50	7,00	4,1
11	0	-1,68	0	5,00	0,00	7,00	-1,2
12	0	1,68	0	5,00	5,00	7,00	13,0
13	0	0	-1,68	5,00	2,50	5,00	71,1
14	0	0	1,68	5,00	2,50	9,00	65,9
15	0	0	0	5,00	2,50	7,00	30,8
16	0	0	0	5,00	2,50	7,00	5,0
17	0	0	0	5,00	2,50	7,00	-1,8
18	0	0	0	5,00	2,50	7,00	0,2

O ensaio 6 foi o que forneceu maior remoção de turbidez, com valor de turbidez residual igual a 1,0 UNT (Tabela 3.2). Comparando-se os ensaios 6 e 2, pode-se especular que o meio básico foi mais efetivo. Em contrapartida, o primeiro ensaio apresentou o pior desempenho geral, provavelmente pela dose empregada não ter sido suficiente para neutralizar as cargas, consequentemente apresentando aumento na turbidez remanescente (Tabela 3.2).

Na Figura 3.4 está ilustrado o Diagrama de Pareto correspondente à regressão realizada, onde são apresentados os efeitos dos termos estudados na variável resposta ao nível de significância de 5%. Observou-se que o efeito quadrático do pH (CC), a interação entre a dose de mutamba e o pH (BC) e a interação entre a dose de sulfato de alumínio e a dose de mutamba (AB) foram significativos ($p \leq 0,05$). Por hierarquia, os fatores dose de sulfato de alumínio, dose de mutamba e pH foram mantidos no modelo matemático.

Figura 3.4 – Efeitos de Pareto para turbidez removida ao nível de 5% de significância.



Não foi observada relação significativa entre os efeitos quadráticos da dose de sulfato de alumínio e da dose de mutamba com a remoção de turbidez ($p>0,05$). Ainda, o efeito da interação da dose de sulfato de alumínio e o pH também não apresentou influência significativa no valor da variável resposta ($p>0,05$). Portanto, estes efeitos foram retirados do modelo matemático.

O modelo matemático obtido por meio da regressão em unidades não codificadas para representar a turbidez removida em UNT (Tremov) em função da dose de sulfato de alumínio em mg.L^{-1} (A), dose de mutamba em mg.L^{-1} (B) e pH (C), está apresentado na equação 4.

$$\text{Tremov} = 556 + 11,47 \cdot A + 85,9 \cdot B - 199,8 \cdot C + 16,00 \cdot C \cdot C - 3,50 \cdot A \cdot B - 9,13 \cdot B \cdot C$$

(Equação 4)

Na Tabela 3.3.3 estão apresentados os parâmetros de ajuste do modelo selecionado.

Tabela 3.3 – Dados do modelo ajustado.

Modelo/ Estatística	
R^2	79,42%
R^2 ajustado	68,19%
S (desvio padrão dos resíduos)	17,17 UNT
Falta de ajuste	n.s.

n.s.: não significativa ($p>0,05$)

Por meio dos resultados observados na Tabela 3.3 concluiu-se que o modelo obtido é efetivo para predizer a remoção de turbidez em água sintética, pois o coeficiente de determinação do mesmo é superior a 75% (Naik and Setty, 2014) e não foi observada falta de ajuste ($p=0,427$)

3.1.10 Otimização

O ótimo previsto, quando aplicado o modelo apresentado na Equação 4 e selecionado a opção de alvo no software estatístico Minitab (alvo =77 UNT), foi de 5 mg.L^{-1} de sulfato de alumínio, $2,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de extrato de mutamba e pH igual a 9. Contudo, este não é a única condição ótima para o processo de coagulação / floculação. As superfícies de resposta indicaram outras combinações de níveis com remoções de turbidez satisfatórias tanto para o meio básico quanto para o meio ácido.

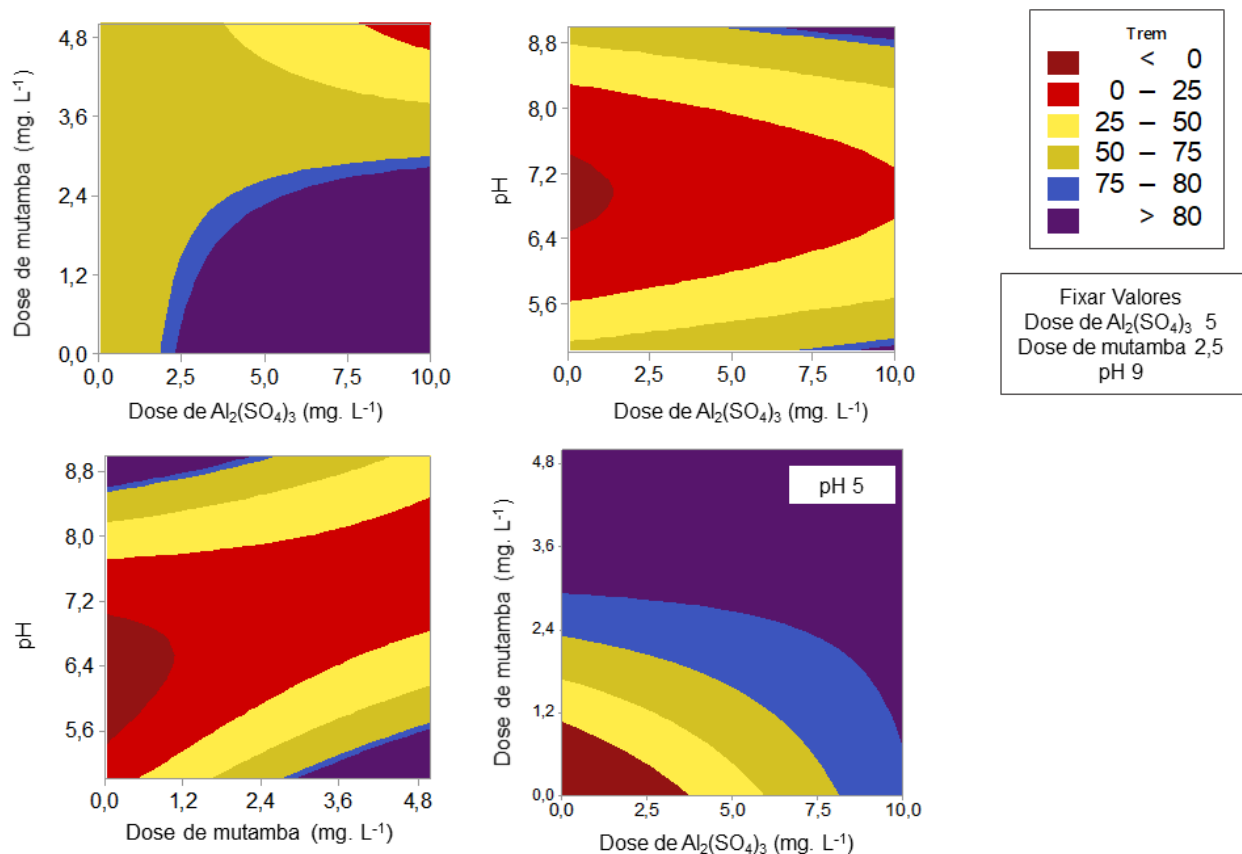
O valor de pH calculado para se atingir o ótimo (pH=9) também foi reportado por Bazrafshan et al. (2015). Os autores avaliaram o uso de semente de pistache ($0,4 \text{ mg.L}^{-1}$) como coagulante auxiliar ao cloreto de ferro (10 mg.L^{-1}) e concluíram que o meio básico é eficiente para elevadas remoções de turbidez (97%) para alguns tipos de polímeros naturais. Além disso, os autores atribuíram a remoção de turbidez ao mecanismo de adsorção.

Em um trabalho que avaliou o uso de um composto biofloculante (CBF) como auxiliar ao sulfato de alumínio para tratar água sintética (15 UNT) com presença de ácido húmico observaram-se resultados próximos a presente pesquisa: dose de sulfato de alumínio (7 mg.L^{-1}), dose de coagulante auxiliar (2 mg.L^{-1}) e os testes foram conduzidos em meio básico (8,3–8,7). Ainda, este composto apresentou potencial zeta muito semelhante ao obtido para a mutamba ($-34,5 \text{ mV}$). Portanto, mesmo com características distintas da água a ser tratada, a natureza dos coagulantes fez com que os resultados obtidos fossem muito semelhantes (Bo et al., 2011).

Em um estudo complementar, Bo et al. (2012) buscaram compreender o efeito do pH na formação e estrutura dos flocos formados pelos mesmos coagulantes supracitados. Os pesquisadores observaram que o meio mais básico proporciona flocos maiores e mais compactos que se formam mais rápido do que em meio ácido.

O gráfico de contorno mostra a relação entre uma resposta ajustada e duas variáveis contínuas em uma visão bidimensional, na qual pontos de mesmo valor de resposta estão conectados para produzir as linhas de contorno. Na Figura 3.5 apresentam-se os gráficos de contorno obtidos via modelagem, considerando-se que a terceira variável (não mostrada no gráfico) foi fixada no ponto ótimo escolhido, com exceção da figura extra adicionada no canto inferior direito, na qual foi fixado o valor de pH igual a 5.

Figura 3.5 – Gráfico de contorno 3 em 1 da turbidez removida com as interações de dose de sulfato de alumínio em mg.L^{-1} (A); dose de mutamba em mg.L^{-1} (B) e pH (C).



Observa-se pela Figura 3.5 que em pH 9, elevadas doses de mutamba e sulfato de alumínio acarretam em uma remoção ineficiente de turbidez, provavelmente devido a ocorrência de reestabilização das partículas coloidais. Este fenômeno já foi reportado pela literatura e pode ser atribuído a dose excessiva do polímero além do ponto ótimo (Lim et al., 2018).

Além disso, pelo gráfico que relaciona a dose de mutamba com a dose de sulfato de alumínio (pH fixado em 9) pode-se constatar que a região do ótimo selecionado está localizada na faixa onde a turbidez removida atinge >75 UNT.

Contudo, observa-se que há múltiplos ótimos tanto para o meio básico quanto para o meio ácido. No gráfico que relaciona a dose de mutamba com a dose de sulfato de alumínio e o pH está fixado no valor 5, pode-se destacar as condições de 2,5 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio e 3,0 mg.L⁻¹ de mutamba que resultam em excelente remoção de turbidez (Tremov>80 UNT).

A presença de múltiplos ótimos é interessante e deve ser avaliada em conjunto com a variável resposta custo, de modo que o ótimo possa ser selecionado com base na viabilidade técnica e econômica. Portanto, é

necessário que o processo de produção da mutamba como auxiliar de coagulação seja avaliado economicamente.

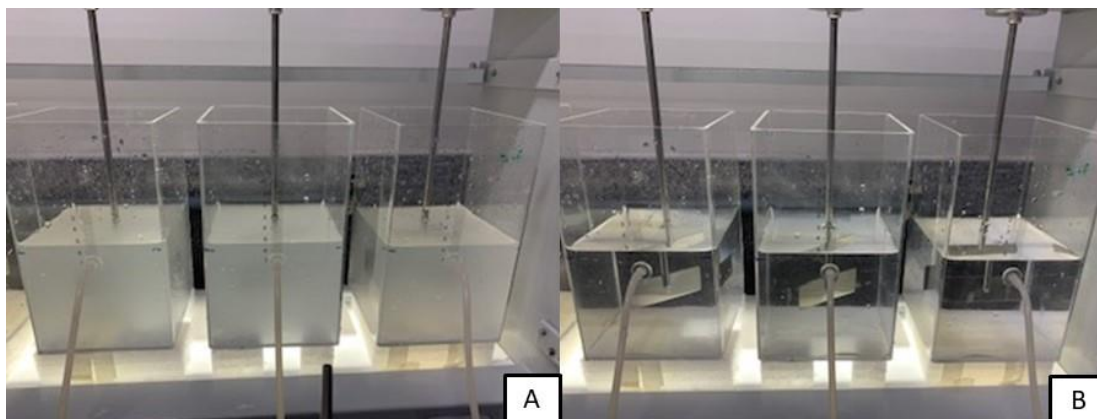
A Figura 3.5 ilustra que a mutamba sozinha alcançaria remoções de turbidez >80 UNT, contudo este ponto não foi testado dentro do delineamento utilizado. Em outro estudo que avaliou o uso da mutamba como coagulante principal para tratar água foram empregadas doses mais elevadas que a sugerida pelo gráfico de contorno ($>40 \text{ mg.L}^{-1}$) e não foram obtidos resultados tão promissores quanto por este trabalho (Feria-Díaz et al., 2016; Rodiño-Arguello et al., 2015). Especula-se que este delineamento apresente fragilidade em prever o comportamento de pontos extremos do tipo “- α , - α , - α ” ou “+ α , + α , + α ”.

Considerando-se os desdobramentos da equação proposta, o desempenho da mutamba como coagulante auxiliar apresentou potencial para reduzir a dose de sulfato de alumínio, coagulante principal, porém a atuação deste polímero ficou mais evidente quando o pH não foi fixado no ótimo determinado pelo software estatístico Minitab ($\text{pH}=9$).

3.1.11 Validação

Com a finalidade de verificar o modelo obtido, testes de validação foram realizados para o ponto ótimo e para outros 6 pontos aleatórios sorteados considerando-se o intervalo estudado para cada variável.

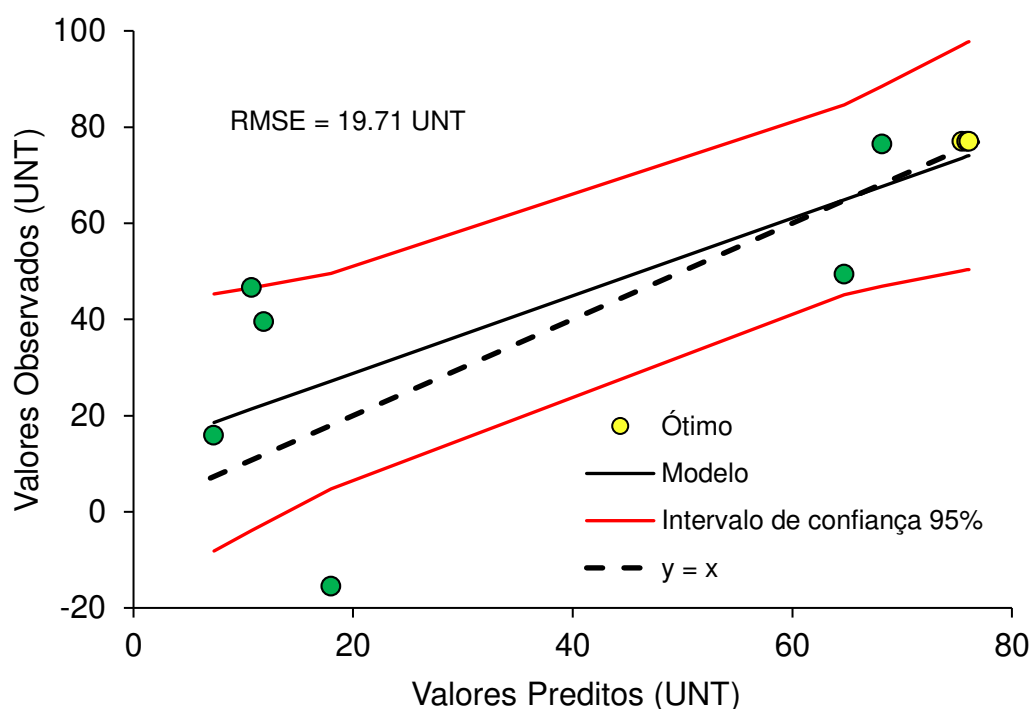
Figura 3.6 – Ensaio de validação do ponto ótimo com as três repetições. (a) corresponde ao estado inicial; (b) após a sedimentação.



Fonte: autor

Na Figura 3.7 relacionam-se os valores preditos pelo modelo com os valores observados de turbidez removida resultante dos ensaios de validação. A linha tracejada ilustra a situação ideal onde os valores observados correspondem aos valores previstos pelo modelo. Já a linha contínua representa o modelo. Desta forma, a relação entre as linhas tracejada e contínua indica as regiões onde o modelo superestima e subestima os resultados de turbidez removida.

Figura 3.7 – Gráfico dos valores observados x valores preditos de turbidez removida (UNT)



O intervalo de confiança ilustrado na Figura 3.7 mostra que apenas um ponto não está contido; este ponto corresponde as seguintes condições: 2,03 mg. L⁻¹ de sulfato de alumínio, 1,01 mg. L⁻¹ de dose de mutamba e pH 5,8. Supõe-se que o modelo apresente deficiência em prever o comportamento de pontos do tipo “- α , - α , - α ” ou “+ α , + α , + α ”, visto que estas condições estão distantes do ponto central (repetições) e não são testadas no delineamento experimental. Como os demais pontos encontram-se dentro do intervalo de confiança e os três ensaios de validação realizados no ponto ótimo escolhido (marcadas em amarelo no gráfico) apresentaram respostas observadas de

75,8 $\pm$ 0,3 UNT, versus uma resposta predita pelo modelo de 77 UNT, considera-se que o modelo selecionado é satisfatório.

3.4 REFERÊNCIAS

- Al-hamadani, Y. A. J., Yusoff, M. S., Umar, M., & Bashir, M. J. K. (2011). Application of psyllium husk as coagulant and coagulant aid in semi-aerobic landfill leachate treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3), 582–587. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.087>
- Antov, M. G., Šć, M. B., Prodanovi, J. M., Kuki, D. V, Vasi, V. M., Tatjana, R. Đ., & Milo, M. M. (2018). Common oak (*Quercus robur*) acorn as a source of natural coagulants for water turbidity removal, 117(February), 340–346. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.022>
- Asrafuzzaman, M., Fakhruddin, A. N. ., & Hossain, M. A. (2011). Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants. *International Scholarly Research Network*, 2011, 6. <https://doi.org/10.5402/2011/632189>
- Bazrafshan, E., Mostafapour, F. K., Ahmadabadi, M., & Mahvi, A. H. (2015). Turbidity removal from aqueous environments by Pistacia atlantica (Baneh) seed extract as a natural organic coagulant aid. *Desalination and Water Treatment*, 56(4), 977–983. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.942704>
- Bo, X., Gao, B., Peng, N., Wang, Y., Yue, Q., & Zhao, Y. (2011). Coagulation performance and floc properties of compound bioflocculant-aluminum sulfate dual-coagulant in treating caulim-humic acid solution. *Chemical Engineering Journal*, 173(2), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.077>
- Bo, X., Gao, B., Peng, N., Wang, Y., Yue, Q., & Zhao, Y. (2012). Effect of dosing sequence and solution pH on floc properties of the compound bioflocculant-aluminum sulfate dual-coagulant in caulim-humic acid solution treatment. *Bioresource Technology*, 113, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.029>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (3rd ed.). IWA.
- Brostow, W., Lobland, H. E. H., Pal, S., & Singh, R. P. (2009). Polymeric flocculants for wastewater and industrial effluent treatment, 31, 157–166.
- Buenaño, B., Vera, E., & Aldás, M. B. (2019). Study of coagulating / flocculating

characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 2019(Vol. 39, N. 1). <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n1.69703>

Carvalho, P. E. R. (2007). *Mutamba Guazuma ulmifolia*. Colombo.

Chakrabarti, S., Banerjee, S., & Chaudhuri, B. (2008). Application of biodegradable natural polymers for flocculated sedimentation of clay slurry, 99, 3313–3317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.049>

Choy, S. Y., Murthy, K., Prasad, N., & Wu, T. Y. (2016). Isolation , characterization and the potential use of starch from jackfruit seed wastes as a coagulant aid for treatment of turbid water. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8024-z>

Di Bernanrdo, L., Dantas Di Bernardo, Â., & Nogueira Voltan, P. E. (2017). *Métodos e técnicas de tratamento de água* (3rd ed.). São Carlos: LDiBe.

Ferasat, Z., Panahi, R., & Mokhtarani, B. (2020). Natural polymer matrix as safe flocculant to remove turbidity from caulim suspension : Performance and governing mechanism. *Journal of Environmental Management*, 255(May 2019), 109939. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109939>

Feria-Díaz, J., Rodiño-Arguello, J., & Gutiérrez-Ribon, G. (2016). Behavior of turbidity, pH, alkalinity and color in Sinú River raw water treated by natural coagulants. *Revista Facultad de Ingeniería*, 78, 119–128. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n78a16>

Gao, B., Chu, Y., Yue, Q., Wang, B., & Wang, S. (2005). Characterization and coagulation of a polyaluminum chloride (PAC) coagulant with high Al 13 content. *Journal of Environmental Management*, 76, 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.12.006>

Guo, B., Yu, H., Gao, B., Rong, H., Dong, H., Ma, D., ... Zhao, S. (2015). Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate with cationic polyamidine as coagulant aid for caulim-humic acid treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 481, 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.06.017>

- Jiang, J. Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>
- Jones, A. N., & Bridgeman, J. (2016). Investigating the characteristic strength of flocs formed from crude and purified Hibiscus extracts in water treatment. *Water Research*, 103, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.019>
- Jones, B. (2017). The Earth's population is going to reach 9.8 billion by 2050. Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2017/08/the-earths-population-is-going-to-reach-9-8-billion-by-2050?utm7>
- Katrivesis, F. K., Karela, A. D., Papadakis, V. G., & Paraskeva, C. A. (2019). Revisiting of coagulation-flocculation processes in the production of potable water. *Journal of Water Process Engineering*, 27(December 2018), 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.007>
- Lee, C. S., Robinson, J., & Chong, M. F. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment Author: *Process Safety and Environment Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.010>
- Libânio, M. (2015). *Fundamentos de qualidade e tratamento de água* (4rd ed.). Átomo.
- Lim, B., Lim, J., & Ho, Y. (2018). Garden Cress Mucilage as A Potential Emerging Biopolymer for Improving Turbidity Removal in Water Treatment. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.015>
- Lima, G. J. de A., Giordano, G., & Filho, O. B. (2007). Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto. Universidade Estadual do Rio de Janeiro.
- Lima Júnior, R. ., & Abreu, F. O. M. . (2018). Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Flocculantes para Tratamento de Águas : Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades. *Revista Virtual de Química*, 10(3). <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180052>
- Lin, J., Couperthwaite, S. J., & Millar, G. J. (2017). Effectiveness of aluminium

- based coagulants for pre-treatment of coal seam water. *Separation and Purification Technology*, 177, 207–222. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.010>
- Liu, Z., Wei, H., Li, A., & Yang, H. (2019). Enhanced coagulation of low-turbidity micro-polluted surface water: Properties and optimization. *Journal of Environmental Management*, 233(November 2018), 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.101>
- Mehdinejad, M., Bina, B., Nikaeen, M., & Attar, H. (2009). Effectiveness of chitosan as natural coagulant aid in treating turbid waters. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(4), 845–850.
- Mehdinejad, M. H., & Bina, B. (2018). Application of Moringa oleifera coagulant protein as natural coagulant aid with alum for removal of heavy metals from raw water. *Desalination and Water Treatment*, 116, 187–194. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22546>
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mohammadi, A. S., Faradmali, J., Hoseinzadeh, E., & Asgari, G. (2018). Removal of Turbidity and Humic Acids Using Chitosan As a Coagulant Aid: Modeling With Artificial Neural Network. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(1), 31–38. <https://doi.org/10.30638/eemj.2017.004>
- Muthuraman, G., & Sasikala, S. (2014). Journal of Industrial and Engineering Chemistry Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants, 8–12.
- Muyibi, S. A., & Alfugara, A. M. S. (2003). Treatment of surface water with Moringa oleifera seed extract and alum - A comparative study using a pilot scale water treatment plant. *International Journal of Environmental Studies*, 60(6), 617–626. <https://doi.org/10.1080/723032000087925>
- Naik, S. S., & Setty, Y. P. (2014). Optimization of parameters using response surface methodology and genetic algorithm for biological denitrification of wastewater, 823–830. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0266-4>

- Nourani, M., Baghdadi, M., Javan, M., & Bidhendi, G. N. (2016). Production of a biodegradable flocculant from cotton and evaluation of its performance in coagulation-flocculation of caulim clay suspension: Optimization through response surface methodology (RSM). *Biochemical Pharmacology*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.028>
- Priya, T., Tarafdar, A., Gupta, B., & Mishra, B. K. (2017). Effect of bioflocculants on the coagulation activity of alum for removal of trihalomethane precursors from low turbid water. *Journal of Environmental Sciences*, 70, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.09.019>
- Ravina, L. (1993). *Everything you want to know about Coagulation & Flocculation* (4th ed.). Virginia: Zeta-Meter, Inc.
- Rodiño-Arguello, J., Fera-Díaz, J., Paternina-Urbe, R., & Marrugo-Negrete, J. (2015). Sinú River raw water treatment by natural coagulants, 76, 90–98. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a11>
- Saleem, M., & Bachmann, R. T. (2019). A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 72, 281–297. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.12.029>
- Santos, E., Teixeira, A. R., Almeida, C., Libânio, M., & Pádua, V. L. (2007). Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12(4), 361–370.
- Jadhava, M., & Mahajan, Y. (2013). A comparative study of natural coagulants in flocculation of local clay suspensions of varied turbidities. *Journal Civil Engineering and Technology*, 26–39.
- VanLoon, G., & Duffy, S. (2018). *Environmental Chemistry - A global perspective* (4th ed.). Oxford.
- World agroforestry center - guazuma ulmifolia. (2019). Retrieved December 15, 2019, from <http://old.worldagroforestry.org/treedb2/speciesprofile.php?Spid=944>
- Xue, Y., Liu, Z., Li, A., & Yang, H. (2019a). Application of a green coagulant with

- PACl in efficient purification of turbid water and its mechanism study. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 81, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.01.015>
- Xue, Y., Liu, Z., Li, A., & Yang, H. (2019b). Application of a green coagulant with PACl in efficient purification of turbid water and its mechanism study. *Journal of Environmental Sciences*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.01.015>
- Yamamura, H., Putri, E. U., Kawakami, T., Suzuki, A., Ariesyady, H. D., & Ishii, T. (2019). Dosage optimization of polyaluminum chloride by the application of convolutional neural network to the floc images captured in jar tests. *Separation and Purification Technology*, 116467. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116467>
- Yang, R., Li, H., Huang, M., Yang, H., & Li, A. (2016). A review on chitosan-based flocculants and their applications in water. *Water Research*, 95(2015), 59–89. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.068>
- Zhao, S., Gao, B., Li, X., & Dong, M. (2012). Influence of using Enteromorpha extract as a coagulant aid on coagulation behavior and floc characteristics of traditional coagulant in Yellow River water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 200–202, 569–576. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.097>
- Zhao, Y. X., Wang, Y., Gao, B. Y., Shon, H. K., Kim, J. H., & Yue, Q. Y. (2012). Coagulation performance evaluation of sodium alginate used as coagulant aid with aluminum sulfate, iron chloride and titanium tetrachloride. *Desalination*, 299, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.026>

4. CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CONCLUSÕES

O emprego da mutamba como coagulante auxiliar ao sulfato de alumínio se mostrou ser uma alternativa em potencial para substituição de polímeros sintéticos e para diminuição da dose do coagulante principal.

A análise do potencial zeta mostrou características aniônicas, com potencial zeta de -31,8 mV e o principal mecanismo de atuação do coagulante auxiliar estudado é a adsorção / formação de pontes.

Os resultados mostraram que efeito quadrático do pH, a interação entre a dose de extrato de mutamba e o pH e a interação da dose de sulfato de alumínio com a dose de extrato de mutamba foram significativos ($p \leq 0,05$).

O modelo de segunda ordem foi o mais apropriado para descrever a remoção de turbidez. As condições ótimas escolhidas foram pH 9, dose de sulfato de alumínio de 5 mg.L⁻¹ e dose de extrato de mutamba de 2,5 mg.L⁻¹ com 77 UNT de turbidez removida. Nessas condições, com a adição da mesma solução afluyente, houve excelente desempenho nos testes de validação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar se outros meios extratores acarretam em maior atividade de coagulação para a *Guazuma ulmifolia*;
- Avaliar se o armazenamento afeta a atividade de coagulação da *Guazuma ulmifolia*;
- Avaliar os flocos formados com e sem a adição da *Guazuma ulmifolia* como coagulante auxiliar e os custos do processo;
- Avaliar a quantidade de lodo gerado com e sem a adição da *Guazuma ulmifolia*;
- Comparar os custos do processo e eficiência do *Guazuma ulmifolia* e Tanfloc.