



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE *Opuntia cochenillifera* COMO AUXILIAR DE
FLOCULAÇÃO EM ÁGUA DE ALTA TURBIDEZ

KAMILA JESSIE SAMMARRO SILVA

BELO HORIZONTE

2016

KAMILA JESSIE SAMMARRO SILVA

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE *Opuntia cochenillifera* COMO AUXILIAR DE
FLOCULAÇÃO EM ÁGUA DE ALTA TURBIDEZ

Trabalho de Conclusão de Curso II,
apresentado ao Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
para obtenção do título de Engenheira
Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Elizabeth Regina Halfeld da Costa

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Andréa Rodrigues Marques Guimarães

BELO HORIZONTE

2016

Silva, Kamila Jessie Sammarro.

S---

Estudo da aplicação de *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação em água de alta turbidez / Kamila Jessie Sammarro Silva - 2016

64 f.; -- cm.

Orientadora: Elizabeth Regina Halfeld da Costa

Co-orientadora: Andréa Rodrigues Marques Guimarães

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016

1. Tratamento de água. 2. Polímeros naturais. 3. Coagulação. I. Silva, Kamila Jessie Sammarro. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Estudo da aplicação de *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação em água de alta turbidez.

CDD -----



Serviço Público Federal – Ministério da Educação
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENGENHARIA
AMBIENTAL E SANITÁRIA**

ATA DE DEFESA FINAL TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Aos **28** dias do mês de novembro de 2016, no *campus* I do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, reuniram-se os professores Elizabeth Regina Halfeld da Costa, Andrea Rodrigues Marques Guimarães, Fernando Antônio Jardim e Valter Pádua, para participarem da banca de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**Estudo da Aplicação da *Opuntia Cochenillifera* como auxiliar de floculação em águas de turbidez alta**”, de autoria da aluna: **Kamila Jessie Sammarro Silva**, do curso de Engenharia de Ambiental e Sanitária. Uma vez avaliado, o trabalho foi declarado:

- Aprovado.
 Reprovado.

Belo Horizonte, 28 de novembro de 2016.

Banca Examinadora:

Elizabeth R. Halfeld da Costa

Professor Orientador:
Elizabeth R. Halfeld da Costa

Fernando Antônio Jardim

Prof. Fernando Antônio Jardim

Valter Pádua

Prof. Váter Pádua

Andrea Rodrigues Marques Guimarães

Andrea Rodrigues Marques Guimarães
Coorientadora

AGRADECIMENTOS

Às minhas orientadoras e professoras, Beth e Andréa, obrigada por terem me acompanhado neste projeto, pela paciência e pelo conhecimento que me passaram. À Andréa, meu “obrigada” é um pouquinho maior, para equipará-la, como orientadora, igualmente presente e valiosa.

Agradeço aos membros da banca, Válter Pádua e Fernando Jardim, por terem aceitado participar desta avaliação. Saibam que foram escolhidos por extrema admiração e por tê-los como pessoas e profissionais nos quais eu me inspiro. Sou fã!

À COPASA e aos funcionários da ETA Rio das Velhas, agradeço por toda a presteza e gentileza, além do fornecimento dos materiais e dos galões de água pesadíssimos que Beth trouxe. Obrigada por toda atenção!

Às técnicas do Laboratório de Ecologia, Luana e Damares, agradeço por terem sido tão prestativas e, além de tudo, gentis!

À Andreza Maia, que surgiu agora no fim da minha graduação, mil vezes obrigada pelo auxílio com as leituras de turbidez e pelas palavras de conforto, que também ganhei de Laura Agapito e das minhas grandes amigas Ana Paula Pimenta e Larissa Lima (que verificou periodicamente o andamento do meu TCC e do meu bem-estar com e-mails de assunto “Você está viva?”). Vocês são pessoas essenciais, com quem convivi aqui no CEFET, onde, por muitas vezes, passei mais tempo do que no trabalho ou na minha própria casa. Obrigada a todos os amigos que fiz durante essa jornada.

Ao Wederson Nunes, um parágrafo específico, para um agradecimento específico à ajuda ge-ne-ra-li-za-da que me forneceu durante toda essa saga da graduação. Weds, obrigada por ter sido sempre meu braço direito em todos os projetos e um grande amigo que Beth acidentalmente inseriu na minha vida.

Outro “obrigada” para o professor Cléverson Garcia da Química que, junto à professora Júnia Braga (dona Júnia) e Késsia, do Laboratório de Caracterização de Materiais me auxiliaram com os espectros IV e solucionaram minhas dúvidas.

Aos professores do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, obrigada por todo o conhecimento que transmitiram. Vocês são exemplos.

Agradeço a paciência e o carinho do meu noivo Lucas, que levou lanche para mim no laboratório, me buscou quando eu não me aguentava em pé de tanto abaixar

e levantar para encher aquele jarrete e sempre valorizou minha dedicação. Além disso, obrigada por ter me ajudado com a estatística e por ter intercedido junto à professora Beth (a Beth querida do DECOM, obrigada também!).

E finalmente, Adelina e Jefferson: Mãe, Pai, vocês merecem agradecimentos acima de qualquer outra pessoa. Obrigada por estarem presentes em absolutamente todas as etapas da minha vida e principalmente nesta. Vocês sempre foram e serão meu conforto e referência para mim, mostrando que tem alguém que me ama e confia no meu potencial acima de qualquer dificuldade. Obrigada principalmente a você, mãe, pelo apoio e coragem que sempre me inspirou. Vocês dois sempre foram os maiores provedores de amor e de educação para mim, que é o que, de fato, CONSTRÓI. Amo vocês.

RESUMO

SILVA, K. J. S., *Estudo da aplicação de Opuntia cochenillifera como auxiliar de floculação em água de alta turbidez*. 2016. 64f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária), Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

Águas provenientes de mananciais não tratados apresentam elevado risco à saúde, pois caracterizam-se por alta turbidez e cor. A remoção de turbidez em águas é predominantemente realizada por tecnologias de tratamento que utilizam a coagulação, i.e., a desestabilização de colóides, em geral, com a utilização de agentes químicos. Polímeros vegetais constituem um insumo economicamente viável e ambientalmente aceito e devem ser estudados. O objetivo deste trabalho verificar a eficiência do extrato aquoso de cladódios do cacto *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação do cloreto férrico no tratamento de água de alta turbidez. Utilizou-se o extrato vegetal obtido pela secagem, pulverização, diluição em água destilada e posterior filtração. Caracterizou-se o extrato em termos de grupos funcionais a partir do seu espectro infravermelho, tendo sido identificadas bandas de absorção referentes a estruturas de carboidratos, presentes na mucilagem, bem como sítios adsorptivos. A clarificação da água foi realizada por jarreste, tendo como variáveis a de velocidade de sedimentação, dosagem de coagulante químico, pH da água bruta e concentração de polímero natural. A partir dos resultados, verificou-se por análise de variância (*one-way ANOVA*) que concentrações diferentes do extrato do cacto diminuiriam significativamente o efeito do cloreto férrico na remoção de turbidez. O tratamento com pH 9 apresentou resultados significativamente melhores, de acordo com a ANOVA fatorial, para maiores concentrações de coagulante químico. Concluiu-se que o uso de *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação do cloreto férrico não contribuiu com aumento de eficiência da coagulação em águas de alta turbidez para os pHs e dosagens estudadas. As configurações dos experimentos demandaram a coagulação com o mecanismo de varredura, onde predominam alta turbidez, maiores dosagens de coagulante e pH elevado.

Palavras-chave: Polímeros naturais. Auxiliar de floculação. *Opuntia cochenillifera*. Tratamento de água.

ABSTRACT

SILVA, K. J. S., *Estudo da aplicação de Opuntia cochenillifera como auxiliar de floculação em água de alta turbidez*. 2016. 64p. Monograph (Degree in Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

Water from untreated sources consist on a high health risk because this sort of water contains high turbidity and color. Turbidity removal is predominantly carried out by water treatment technologies using coagulation, i.e., colloid destabilization using chemical agents, mostly. Plant-based polymers are an economically viable and environmentally accepted and must be investigated. The present study aimed to verify the efficiency of the aqueous extract of *Opuntia cochenillifera* cladodes as flocculation aid in addition to ferric chloride when treating high turbidity water. The vegetal extract was obtained from drying, pulverizing, dilution into distilled water and then filtration. The extract was characterized in terms of functional groups from the infrared spectrum and some absorption bands referring to carbohydrates found in the mucilage were identified as well as radicals that constitute adsorption sites. The water clarification was performed by jarrest, having as variables the sedimentation velocity, chemical coagulant dosage, raw water pH and the concentration of the natural polymer. The results showed by analysis of variance (one-way ANOVA) that different concentrations of the cactus extract significantly decreased the effect of the ferric chloride on the turbidity removal. The treatment with pH 9 presented significantly better results, according to the factorial ANOVA, for higher concentrations of chemical coagulant. It followed that the application of *Opuntia cochenillifera* as a flocculation aid to ferric chloride did not improve coagulation efficiency in high turbidity water for the studied values of pH and dosage. The experiment configurations required sweep coagulation, which is a mechanism in which high turbidity, higher coagulant doses and high pH prevail.

Key-words: Natural polymer. Flocculant aid. *Opuntia cochenillifera*. Water treatment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama que representa uma partícula coloidal.....	18
FIGURA 2 – Exemplar de <i>Opuntia cochenillifera</i> utilizada, localizada no campus I do CEFET/MG.....	30
FIGURA 3 - Filtração da <i>Opuntia cochenillifera</i> após diluição do conteúdo em mg em 50 mL de água destilada	32
FIGURA 4 - Gráfico de dosagem de sais férricos da ETA Rio das Velhas	34
FIGURA 5 - Fluxograma do procedimento para o ensaio de jarteste.....	35
FIGURA 6 - Montagem geral do ensaio de jarteste.....	37
FIGURA 7 - (a) Cladódios de <i>Opuntia cochenillifera</i> ; (b) Aspecto do vegetal após 24 horas de secagem a 60°C; (c) Produto da trituração dos cladódios desidratados; (d) Produto desidratado, triturado e peneirado	39
FIGURA 8 - Espectro infravermelho das frações sólida e aquosa da <i>Opuntia cochenillifera</i>	40
FIGURA 9 - Efeito da concentração de cactácea no tratamento com cloreto férrico a 10 mg/L de Fe_2O_3 , para (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min. (a) $F=26,26$ e $P>0,0001$ (b) $F=33,67$ e $P<0,0001$	43
FIGURA 10 - Experimento com dosagem de cloreto férrico de 10 mg/L de Fe_2O_3 e pH 9 (a) ao fim da floculação; (b) ao fim da sedimentação.....	44
FIGURA 11 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 10 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,7 cm/min. (a) $F = 33,67$ e $P<0,0001$; (b) Não foi significativamente diferente.	46
FIGURA 12 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 10 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,35 cm/min. (a) $F=129,02$ $P<0,001$; (b) Não foi significativamente diferente.	46
FIGURA 13 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min. (a) $F=956,44$ $P<0,0001$ (b) $F=324,44$ $P<0,0001$	48
FIGURA 14 - Sedimentação dos flocos no ensaio com 5 mg/L de Fe_2O_3 e pH 7.....	48
FIGURA 15 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,7 cm/min. (a) $F=83,81$ $P<0,0001$; (b) $F=109,26$ $P<0,0001$	49

FIGURA 16 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe_2O_3 em a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,35 cm/min. (a) F=16,9 P<0,0001; (b) F=154,62 P<0,0001	49
FIGURA 17 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 2 mg/L de Fe_2O_3 em pH 7 nas velocidades de sedimentação (a) 2 cm/min, (b) 0,7 cm/min e (c) 0,35 cm/min. (a) F = 785,26 P <0,0001; (b) F = 40,69 P<0,0001; (c) F=18,62 P<0,0001.....	50
FIGURA 18 - Efeito do pH sobre a remoção de turbidez nas diferentes concentrações de cactácea e aplicação de dosagens de 10 e 5 mg/L de Fe_2O_3	51

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Métodos de processamento de vegetais para uso como coagulante ..	23
QUADRO 2 - Atividade coagulante, quando várias formas de <i>Opuntia</i> spp. foram adicionadas a água turva com pH igual a 9,8.....	24
QUADRO 3 - Componentes responsáveis pela ação coagulante relatada para algumas espécies vegetais	24
QUADRO 4 - Relação de polímeros naturais de origem vegetal, ação estudada e seus respectivos empregos	26

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Triturado bruto de <i>Opuntia cochenillifera</i> (mg) diluído em 50 mL de água destilada para obtenção das concentrações de trabalho	32
TABELA 2 – Parâmetros da água bruta coletada no manancial Rio das Velhas, no ponto de captação da COPASA.....	33
TABELA 3 - Parâmetros adotados no ensaio de jarreste	36
TABELA 4 - Balanço de massa do processo de secagem dos cactos	39
TABELA 5 - Tipos de ligação em função da região de absorção no espectro infravermelho.....	40
TABELA 6 - Efeito dos diferentes tratamentos sobre o pH	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Coagulação química	17
<u>3.1.1 Estado coloidal</u>	<u>17</u>
<u>3.1.2 Processos de coagulação e floculação</u>	<u>19</u>
<u>3.1.3 Mecanismos de coagulação</u>	<u>20</u>
3.1.3.1. <i>Compressão da camada difusa</i>	20
3.1.3.2 <i>Adsorção e neutralização</i>	20
3.1.3.3 <i>Varredura</i>	21
3.1.3.4. <i>Formação de pontes</i>	21
3.2 Utilização dos polímeros naturais na coagulação	21
<u>3.2.1 Procedimentos adotados nos estudos da coagulação com polímeros vegetais</u>	<u>22</u>
<u>3.2.2 Caracterização dos coagulantes vegetais</u>	<u>24</u>
<u>3.2.3 Panorama da utilização de polímeros naturais na coagulação</u>	<u>25</u>
<u>3.2.4 Pesquisas sobre polímeros vegetais no tratamento de água</u>	<u>27</u>
4 METODOLOGIA	30
4.1 Processamento da cactácea	30
4.2 Espectro infravermelho da <i>Opuntia cochenillifera</i>	31
4.3 Soluções de cactácea para auxiliar de floculação	31
4.4 Solução de coagulante químico	33
4.5. Coleta e caracterização da água bruta	33
4.6 Ensaio de jarreste	34

4.7 Caracterização das amostras	37
4.8 Estudo estatístico dos dados de remoção de turbidez.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Análise do espectro infravermelho da <i>Opuntia cochenillifera</i>	40
5.3 Avaliação da aplicação de <i>Opuntia cochenillifera</i> como auxiliar de floculação.....	41
5.3.1 Resultados para dosagem de 10 mg/L de Fe_2O_3	43
5.3.2 Resultados para dosagem de 5 mg/L de Fe_2O_3	47
5.3.3 Resultados para a dosagem de 2 mg/L de Fe_2O_3	50
5.3.4 Avaliação da influência do pH e concentração de coagulante químico a partir da ANOVA fatorial	51
6 CONCLUSÕES	54
7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS.....	56
ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO CLORETO FÉRRICO	63
ANEXO B – BOLETIM INFORMATIVO DA CAL HIDRATADA	64

1 INTRODUÇÃO

Acesso à água potável é um direito vital. Contudo, de acordo com o Relatório de Desenvolvimento Humano, em 2015, mais de 660 milhões de pessoas usam fontes impróprias de água de abastecimento e 2,4 bilhões de pessoas não possuem instalações sanitárias adequadas. Além disso, o acesso à água potável e saneamento básico é desproporcional entre áreas rurais e urbanas ao redor do mundo (UNDP, 2015).

As águas provenientes de mananciais não tratados, em geral, podem apresentar risco à saúde, pois caracterizam-se, muitas vezes, por alta turbidez e cor aparente, principalmente nos períodos chuvosos, devido à quantidade de partículas em suspensão, coloidais e dissolvidas (HENRIQUES, 2012). Tal situação expõe as pessoas a risco de doenças transmitidas pela água por poder estar associada à presença de microrganismos.

A remoção de turbidez e cor geralmente é realizada por meio do processo de coagulação, seguido de floculação, o que viabiliza a sedimentação das partículas. Para isso, são utilizados agentes coagulantes, que promovem a desestabilização dos coloides, os quais aglutinam-se ao serem submetidos a gradientes de velocidade menores, tornando-se mais aptos a sedimentar (RICHTER, 2009).

Os coagulantes químicos são os mais comumente aplicados. No Brasil, utilizam-se principalmente os sais de alumínio (sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio) e de ferro (cloreto férrico, sulfato férrico e sulfato ferroso clorado) (PÁDUA, 2006). Seu uso tem eficácia reconhecida e bem delimitada, dependendo da qualidade da água, mas, apesar disso, envolve custos e está associada a algumas desvantagens. Uma delas deve-se ao fato de os coagulantes metálicos apresentarem melhor eficiência se a água bruta contiver alcalinidade natural ou adicionada. (CARDOSO, 2007). O ajuste do pH da água está, portanto, associado a despesas com alcalinizantes.

Busca-se coagulantes alternativos ou auxiliares de floculação que sejam economicamente viáveis e ambientalmente aceitos (RAMOS, 2005). Uma opção são os polímeros naturais, que, comparados aos sais metálicos, apresentam várias vantagens por serem biodegradáveis e não-tóxicos, e ainda produzem lodo em menor quantidade e com menores teores de metais (BONGIOVANI *et al.*, 2010). Estas são questões que os tornam atrativos.

De acordo com COSTA (2009), poucas estações de tratamento utilizam algum tipo de polímero como auxiliar de floculação. Na escolha desses produtos, nem sempre a qualidade da água a ser tratada é levada em consideração, de modo que se faz necessário investigar em laboratório opções que, aplicadas à uma dada água bruta, possibilitem obter uma água tratada com qualidade e em quantidade satisfatória, visando sempre obter o menor custo.

Há uma larga variedade de possibilidades de aplicação tratando-se de polímeros provenientes de extratos vegetais. As sementes de *Moringa oleífera* tiveram sua eficiência comprovada para as mais diversas aplicações no tratamento de água, dentre as quais como coagulante primário (HENRIQUES, 2012) e auxiliar de filtração (FRANCO, 2010). O amido de batata, mandioca e araruta (COSTA, 1992) e milho (DI BERNARDO *et al.*, 2000) apresentaram potencial de auxiliares de floculação. Quando utilizados como auxiliares, os polímeros vegetais oferecem diversas vantagens, dentre as quais o acréscimo de tamanho, densidade, resistência e velocidade de sedimentação dos flocos formados (BOLTO e GREGORY, 2007; RICHTER, 2009).

Dentre os vegetais estudados, as cactáceas têm apresentado potencial notório para ação como coagulante e auxiliar de floculação. Os cactos do gênero *Opuntia* (*Nopalea*) apresentaram eficiência relatada para remoção de sólidos suspensos em efluentes e turbidez em água (MILLER *et al.*, 2008; COSTA, *et al.* 2014; VERBEL *et al.*, 2014). Diante da abundância de espécies do referido gênero nas regiões brasileiras, onde é conhecida como “palma” (ZAPPI *et al.*, 2015), justifica-se sua investigação junto aos coagulantes convencionais das ETA's do Brasil, dentre os quais o cloreto férrico, aplicado atualmente na operação do sistema Rio das Velhas da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral verificar, em termos de remoção de turbidez, a eficiência do extrato aquoso do cacto *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação do cloreto férrico no tratamento de água de alta turbidez, proveniente do manancial Rio das Velhas da COPASA-MG.

Foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o processamento da *Opuntia cochenillifera* para uso como auxiliar de floculação;
- Caracterizar os extratos em pó e aquoso da cactácea em termos de grupos funcionais presentes;
- Verificar e avaliar, em escala de bancada, a eficiência do extrato aquoso de *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação em diferentes concentrações e pHs, em termos de remoção de turbidez.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva à mesma. Tal parâmetro refere-se à matéria suspensa presente na água, de qualquer natureza, com tamanho variando desde suspensões grosseiras aos coloides. É causada principalmente por areia, argila e microrganismos em geral (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; SPERLING, 2005). Em águas superficiais, a turbidez está geralmente compreendida na faixa de 3 a 500 NTU, havendo discrepâncias ocasionais devido a existência de solos erodíveis em algumas regiões, o que gera maior carreamento de partículas principalmente em períodos chuvosos (LIBÂNIO, 2010).

O emprego da turbidez como parâmetro indicador da eficiência do tratamento encontra respaldo em recentes estudos associando a remoção desta característica física à de cistos e oocistos de protozoários, principalmente na filtração. O processo de clarificação, contudo, encontra-se anterior a esta etapa no tratamento convencional e abarca as operações unitárias: coagulação, floculação e decantantação/flotação. Estas operações, separadamente ou em conjunto, têm sido propostas como barreiras importantes para a remoção de microrganismos resistentes ao cloro e constituem as fases de maior remoção de turbidez no tratamento em uma Estação de Tratamento de Água (CERQUEIRA, 2008; LIBÂNIO, 2010).

A coagulação química, em si, apresenta uma importância decisiva no desempenho de ETAs convencionais, tornando imprescindível que sejam realizados estudos mais aprofundados sobre os diversos tipos de coagulantes e auxiliares de coagulação passíveis de serem aplicados. Caso esta etapa não tenha êxito, todas as demais estarão prejudicadas, reduzindo a qualidade da água tratada (PAVANELLI e DI BERNARDO, 2002).

A seguir, expõe-se no que consiste a coagulação química e os mecanismos envolvidos nesta. Além disso, será apresentado o papel dos polímeros naturais obtidos a partir de extratos vegetais que vem sendo aplicados no tratamento de água, principalmente como coagulantes alternativos ou auxiliares de floculação.

3.1 Coagulação química

A coagulação química consiste em um processo unitário responsável pela desestabilização das partículas em um sistema aquoso. A finalidade deste processo, no tratamento de água, consiste, portanto, em tornar as impurezas que se encontram em suspensão fina, em estado coloidal ou em solução, passíveis de serem removidas nas etapas seguintes do tratamento (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

3.1.1 Estado coloidal

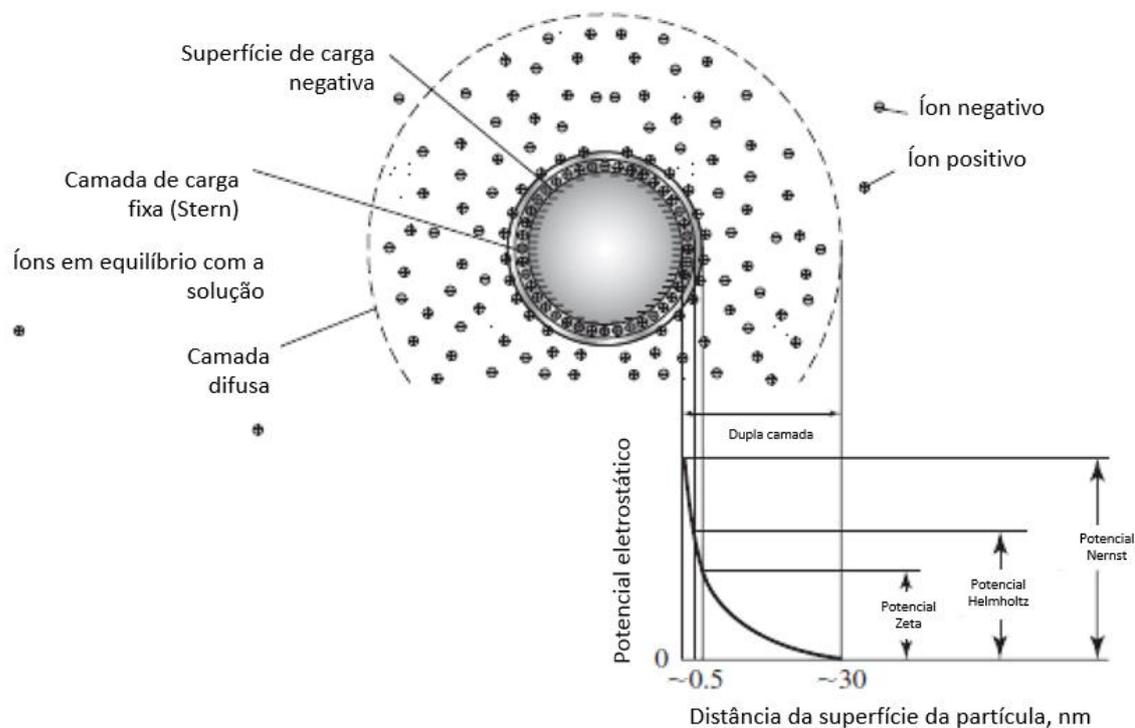
Coloide é uma dispersão de pequenas partículas de um material. Em uma dispersão coloidal, a fase dispersa, embora seja grande quando comparada com as moléculas, é tão pequena que as forças interfaciais e inerciais são significativas na estabilidade (RICHTER, 2009).

Na água, grande parte das partículas coloidais e moléculas das substâncias húmicas possuem cargas elétricas superficiais carregadas negativamente. Todas as partículas coloidais trazem consigo uma carga elétrica, que produz uma força de repulsão mútua, a qual pode ser suficientemente grande, de modo a mantê-las estáveis em suspensão. A origem dessa carga pode ser devida à dissociação de substâncias que constituíam a estrutura do cristal natural, reações químicas na superfície e/ou da adsorção de íons (RICHTER, 2009).

As cargas negativas configuram uma camada rígida sobre a superfície da partícula, a qual denomina-se camada compacta ou camada de Stern. Os íons negativos que se aproximam trazem consigo alguns íons positivos, formando uma camada difusa. Ambas as camadas, difusa e compacta, compõem a chamada dupla camada elétrica (PAVANELLI, 2001). Tal configuração dos íons na superfície das partículas coloidais é apresentada na FIGURA 1, onde é possível visualizar a dupla camada e os potenciais elétricos desenvolvidos ao redor da partícula.

Salienta-se que não é possível medir o potencial elétrico na superfície da partícula, mas é possível medir o potencial na superfície que separa a camada interna da camada difusa. O potencial zeta trata-se de uma medida de estabilidade de uma partícula, indicando o potencial necessário para que haja o rompimento da película protetora dos íons que rodeiam a partícula coloidal (RICHTER, 2009).

FIGURA 1 – Diagrama que representa uma partícula coloidal



Fonte: Adaptado de Davis (2010).

Uma das propriedades mais importantes das dispersões coloidais é a tendência de agregação das partículas. Como resultado do movimento Browniano, são frequentes os choques entre as partículas dispersas num meio líquido, e a estabilidade da dispersão é determinada pela interação entre as partículas durante esses. A atração de Van der Waals que se manifesta entre as partículas é a principal causa que promove a agregação (SHAW, 1975).

Capanema (2004) destacou que as propriedades principais do sistema coloidal estão associadas com a energia na interface livre. A quantidade de energia depende da superfície específica da partícula, isto é, a razão entre a área total da superfície e o volume do setor disperso. A superfície específica aumenta somente até o limite do estado coloidal, porque acréscimos adicionais no tamanho da partícula podem destruir a interface entre o setor disperso e o meio de dispersão, e a energia da interface livre desaparece. O sistema se torna homogêneo, isto é, uma solução verdadeira é formada. Em síntese, Capanema (2004) observa que a propriedade básica e mais importante do estado coloidal é que uma proporção considerável da massa total e da energia livre do sistema está concentrada na interface.

As impurezas da água, portanto, não se aproximam umas das outras, caso suas características não sejam alteradas, sendo necessária a adição de substâncias denominadas coagulantes para que ocorra a remoção desses elementos (CARVALHO, 2008).

3.1.2 Processos de coagulação e floculação

Genericamente, é possível dizer que as operações de coagulação e floculação, juntas, se referem ao processo integral de aglomeração das partículas, onde a coagulação é o processo por meio do qual o agente coagulante é adicionado à água, reduzindo as forças que tendem a manter separadas as partículas em suspensão. A floculação, por sua vez, é a aglomeração dessas partículas por meio de transporte de fluido, de modo a facilitar sua sedimentação, na medida em que fornece condições, em termos de tempo de detenção e intensidade de agitação para aumentar o tamanho das partículas aglomeradas (RITCHER e NETTO, 1991; LIBÂNIO, 2010).

A coagulação convencional depende das características da água bruta e da quantidade de impurezas que ela contém. Sua presença em abundância pode conferir à água flocos mais pesados e com maior capacidade de sedimentação (SILVA, 2005).

Entre as características da água e as condições de operação que afetam o controle da coagulação, estão a cor, a turbidez, a temperatura, a alcalinidade, o pH e a dureza. Podem também ser mencionadas a presença de íons, a concentração e idade da solução coagulante, o tamanho das partículas causadoras de cor e turbidez, bem como o mecanismo predominante e as configurações para mistura rápida (LIBÂNIO, 2010). Quanto às últimas, é possível citar o tempo de mistura rápida e seu gradiente de velocidade.

Em baixas temperaturas o floco se forma vagorosamente e as partículas finas sedimentam lentamente. Já em temperaturas moderadas, o floco se forma mais rapidamente e de forma mais satisfatória. No entanto, a quantidade necessária de coagulante pode aumentar com a elevação da temperatura (CARVALHO, 2008).

O pH de coagulação é um parâmetro decisivo na eficiência do processo. Além disso, considerando que o pH resultante depende do coagulante aplicado, de sua dosagem e da alcalinidade presente na água bruta, faz-se necessário que se conheçam esses dados, de modo a otimizar o processo. Em geral, tais dados são obtidos a partir de ensaios de coagulação em jarreste (RICHTER, 2009).

Ressalta-se que a etapa de coagulação constitui uma parte delicada do tratamento de água para abastecimento. Falhas nesta etapa podem acarretar grandes prejuízos na qualidade e custo do produto distribuído à população, bem como comprometer os processos unitários subsequentes (SPINELLI, 2001).

3.1.3 Mecanismos de coagulação

A compreensão dos mecanismos da coagulação é essencial para o projeto das unidades de mistura rápida e floculação (RICHTER, 2009). Atualmente considera-se a coagulação como o resultado de mecanismos distintos, os quais serão discutidos a seguir, sendo eles: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização, varredura e formação de pontes.

3.1.3.1. Compressão da camada difusa

O primeiro mecanismo de coagulação refere-se à compressão da dupla camada da partícula coloidal. Conforme Libânio (2010), os íons de carga positiva como ferro ou alumínio, atravessam a camada compacta, reduzindo a magnitude do potencial zeta e a espessura da dupla camada, permitindo a posterior aproximação das partículas.

A elevação do número de íons na água acarretará em um acréscimo do número de íons na camada difusa. Esta terá seu volume reduzido para se manter eletricamente neutra, de modo que as forças de Van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

3.1.3.2 Adsorção e neutralização

Há algumas espécies químicas capazes de serem adsorvidas na superfície das partículas coloidais (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Caso tais espécies sejam dotadas de carga contrária à da superfície dos coloides, ocorre a desestabilização dos mesmos. Esta ocorre em uma faixa específica de pH, com a formação de espécies hidrolisadas de carga positiva que podem ser adsorvidas na superfície das partículas (LIBÂNIO, 2010).

Este mecanismo não produz flocos e sim partículas desestabilizadas que podem ser retidas posteriormente em um meio filtrante (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). A adsorção e neutralização de cargas são, portanto, utilizadas em estações de tratamento de água com filtração direta, em geral, onde há a necessidade de desestabilização das partículas para posterior retenção no leito filtrante e não a produção de flocos para posterior sedimentação (CAPANEMA, 2004).

3.1.3.3 Varredura

De acordo com a quantidade do coagulante adicionado, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, é possível ocorrer a formação de precipitados (hidróxido de alumínio ou hidróxido de ferro, no caso de coagulantes químicos) que são capazes de envolver as partículas coloidais. Os flocos resultantes deste mecanismo, quando comparados ao mecanismo de adsorção-neutralização, apresentam maior tamanho e velocidade de sedimentação relativamente alta (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

O mecanismo de varredura é muito utilizado em ETA's convencionais (CAPANEMA, 2004). Nestas instalações, há unidades de floculação e decantação antecedendo a filtração.

3.1.3.4. Formação de pontes

As atrações eletrostáticas entre as partículas das impurezas e os sítios desequilibrados eletricamente formam flocos, por meio de ligações químicas do tipo pontes de hidrogênio ou similar. A existência destas ligações permite a estabilidade de todas as partículas que estão dispersas na água (RAMOS, 2005; FRANCO, 2010).

Este tipo de mecanismo ocorre quando polímeros de cadeias longas e sítios ionizáveis, como os polímeros orgânicos ou naturais, são utilizados (LIBÂNIO, 2010). De acordo com Mendes (1989) e Di Bernardo (2002), a teoria desenvolvida para explicar o comportamento dos polímeros como coagulantes, sejam eles catiônicos ou aniônicos, é baseada na adsorção dos mesmos à superfície das partículas coloidais, seguida pela redução da carga ou pelo chamado “entrelaçamento” das partículas pelos polímeros.

3.2 Utilização dos polímeros naturais na coagulação

Tecnologias que envolvem coagulação são aplicadas tanto no tratamento de águas para abastecimento, quanto no de águas residuais. Estudos com coagulantes naturais vêm sendo conduzidos em busca de explorar uma maneira mais ambientalmente aceitável para os processos convencionais de tratamento (LIMA, 2007; ANASTASAKIS *et al.*, 2009; ORTIZ, ASTUDILLO e GARCÍA, 2013; TREVISAN, 2014). Historicamente, há também evidência para sugerir que comunidades nos países em desenvolvimento têm usado materiais de origem vegetal como estratégia para purificar água para potabilização (MILLER *et al.*, 2008).

Extraídos de plantas ou animais, os coagulantes naturais podem ser opções viáveis a polieletrólitos sintéticos, por exemplo. Tais alternativas tratam de produtos biodegradáveis, com ampla faixa de dosagem aplicável para a floculação de várias suspensões coloidais. Além disso, como podem ser cultivados, colhidos e processados no local, há vantagens de custo em comparação aos químicos comerciais (SANGUI *et al.*, 2006).

Vale ressaltar que os coagulantes convencionais apresentam melhor eficiência se a água bruta contiver alcalinidade natural ou adicionada. Em caso contrário, a formação de flocos não é satisfatória, devido ao excesso de prótons liberados pelo coagulante (CARDOSO, 2007). Esses coagulantes atuam como ácidos dipróticos em solução e consomem alcalinidade. Este fato pode exigir adição de alcalinizantes para que os processos de coagulação e reações de hidrólise de fato ocorram, o que pode implicar custos adicionais ao tratamento (THEODORO, 2013).

No caso de polieletrólitos, não há reações de neutralização entre o coagulante e a água para formar complexos gelatinosos, como ocorre com os coagulantes metálicos. Isso acontece porque tais polímeros são constituídos de complexos de grandes cadeias moleculares, que apresentam sítios com cargas positivas ou negativas, com grande capacidade de adsorção de partículas ao seu redor. Assim, esse tipo de coagulação/floculação praticamente independe da alcalinidade da água, podendo ocorrer numa grande faixa de valores de pH, entre 4,0 e 12,0 (BORBA, 2001), o que corrobora a utilização de coagulantes naturais, no que tange à redução de custos com alcalinizantes ou acidulantes.

Uma das dificuldades da utilização de coagulantes naturais, por outro lado, é o aumento substancial da carga orgânica na água tratada ou nas águas residuais, o que pode resultar em atividades microbianas indesejadas (OLADOJA, 2015). Além disso, a matéria orgânica é uma fonte potencial de odor, cor e gosto (SPERLING, 2005). Identificado, contudo, o agente coagulante específico, dentre os demais constituintes do vegetal, não se faz necessária a inserção de uma quantidade excessiva de matéria orgânica na água ou efluente, mas apenas o constituinte vegetal de interesse.

3.2.1 Procedimentos adotados nos estudos da coagulação com polímeros vegetais

A fim de realizar avaliações preliminares para determinar a ocorrência de coagulação, muitos estudos utilizaram métodos simplificados para processar os

vegetais. Outros, tratando de coagulantes mais comumente aplicados, apresentam procedimentos mais elaborados para extração dos polímeros. O QUADRO 1 exemplifica algumas formas de processamento relatadas na literatura para diferentes vegetais com ação coagulante identificada.

QUADRO 1 - Métodos de processamento de vegetais para uso como coagulante

Espécie	Nome popular	Parte de uso	Processamento	Fonte
<i>Annona diversifolia</i>	Pinha	Semente	Moagem da semente, com desengorduramento e secagem	[1,2]
<i>Brassica spp.</i>	Mostarda	Semente	Extrato cru a temperatura ambiente, então diluído em água destilada, na relação 5% (p/v)	[3]
<i>Cactus latifaria</i>	Cacto	Todo o vegetal	Moagem do cacto seco a 80°C	[4]
<i>Cassia obtusifolia</i> (<i>Senna obtusifolia</i>)	-	Semente	Trituração da semente e diluição em água e filtrada em tecido	[1]
<i>Castanea sativa</i>	Castanha	Semente	Trituração da semente e diluição em água ou solução de NaCl	[5]
<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	Guar	Semente	Trituração da semente e diluição em 0,5% (v/v) HCl	[6]
<i>Jathropa curcas</i>	-	Semente	Pulverização	[5]
<i>Opuntia ficus indica</i>	Cacto / Palma	Todo o vegetal	Moagem do cacto seco a 80°C	[1, 7]
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Feijão	Semente	Trituração da semente e diluição em solução 0,5 mol/L de NaCl	[6,8]
<i>Plantago spp.</i>	Tandragem	Semente	Secagem em estufa e moagem das sementes, para posterior inserção em solução de NaCl em ebulição, com posterior centrifugação da mistura.	[1]
<i>Prosopis juliflora</i>	Algaroba	Semente	Moagem da vagem seca	[6]
<i>Strychnos potatorum</i>	-	Semente	Trituração da semente	[6]
<i>Tamarindus indica</i>	Tamarindo	Semente	Trituração da semente	[6]
<i>Cactus lefaria</i>	Cacto	Todo o vegetal	Remoção da casca e secagem das partes sólidas e gelatinosas a 103° durante 3 horas, seguida de pulverização e peneiramento	[9]

Fonte: [1] Oladoja, 2015; [2] Torres, 2013; [3] Pritchard *et al.*, 2009; [4] Sangui *et al.*, 2006; [5] Anastasakis *et al.*, 2009; [6] Lima, 2007; [7] Ortiz, Astudillo e García, 2013; [8] Díaz *et al.*, 1999; [9] Martínez *et al.*, 2003.

Alguns autores exploraram diferentes métodos de processamento para obtenção do extrato vegetal e como isso influencia as propriedades coagulantes. Miller *et al.* (2008) avaliaram a atividade coagulante apresentada na utilização de diferentes partes do cacto *Opuntia spp.* e trataram-na como “ausente”, caso a remoção de turbidez fosse abaixo de 30% e “presente” para remoção acima de 80%, conforme exposto no QUADRO 2.

QUADRO 2 - Atividade coagulante, quando várias formas de *Opuntia spp.* foram adicionadas a água turva com pH igual a 9,8

Forma de <i>Opuntia</i>	Atividade coagulante
Cladódio fresco	
Cladódio inteiro (parte inferior)	Presente
Cladódio inteiro (parte superior)	Presente
Casca	Ausente
Parte externa do cladódio (sem a casca)	Presente
Parte externa do cladódio (com a casca)	Presente
Parte interna do cladódio	Presente
Cladódio inteiro (macerado)	Presente
Cladódio seco	
Cladódio inteiro (seco a 80°C)	Presente
Cladódio inteiro (seco a 120 °C)	Ausente

Fonte: Miller *et al.* 2008.

3.2.2 Caracterização dos coagulantes vegetais

Os polímeros naturais com ação coagulante apresentam-se principalmente como polissacarídeos ou proteínas, conforme exposto no

QUADRO 3. A identificação desses compostos, porém, não é comumente descrita na literatura.

QUADRO 3 - Componentes responsáveis pela ação coagulante relatada para algumas espécies vegetais

Espécie coagulante vegetal	Componente responsável	Fonte
<i>Annona diversifolia</i>	Polissacarídeo	[1,2]
<i>Brassica sp.</i>	Proteína	[3]
<i>Castanea sativa</i>	Proteína	[4]
<i>Ipomoea dasysperma</i>	Polissacarídeo	[5]
<i>Opuntia ficus indica</i>	Polissacarídeo	[1,6]
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Proteína	[5,7]
<i>Plantago sp.</i>	Polissacarídeo	[1]
<i>Strychnos potatorum</i>	Polissacarídeo	[5]

Fonte: [1] Oladoja, 2015; [2] Torres, 2013; [3] Pritchard *et al.*, 2009; [4] Anastasakis *et al.*, 2009; [5] Lima, 2007; [6] Ortiz, Astudillo e García, 2013; [7] Díaz *et al.*, 1999.

No caso da espécie *Opuntia ficus indica*, popularmente conhecida como “palma”, por exemplo, sua alta capacidade coagulante é comumente atribuída à presença de mucilagem, que é constituída por carboidratos complexos de características viscosas, armazenados na parte interior e exterior dos cladódios (YIN, 2010). Miller *et al.* (2008) sugerem que a coagulação promovida pela *Opuntia* ocorre predominantemente por meio do mecanismo de formação de pontes, onde as partículas da solução não entram em contato direto umas com as outras, mas são ligadas com um material polimérico originado pela cactácea, no caso, a mucilagem.

3.2.3 Panorama da utilização de polímeros naturais na coagulação

No QUADRO 4, estão listadas as ações coagulantes de alguns polímeros naturais de origem vegetal e seus respectivos empregos. Verifica-se uma diversidade considerável de vegetais estudados para remoção de turbidez e cor, isto é, clarificação de água. Há também usos relatados em etapas específicas do tratamento de água de abastecimento e efluentes domésticos e industriais, como na floculação (auxiliar de floculação) e na pré-filtração (auxiliar de filtração), porém buscando sempre desestabilizar ou favorecer a desestabilização dos colóides presentes na água a ser tratada.

Sementes de vegetais do gênero *Senna* (anteriormente tratada na taxonomia como *Cassia* e popularmente conhecidas como “mata-pasto”) foram também abordadas na literatura por apresentarem propriedades coagulantes potenciais. A *Senna javahikai*, por exemplo, foi estudada como auxiliar de coagulação para o tratamento de efluentes de indústria têxtil, objetivando remover cor por meio do processo de coagulação. Foi identificada eficiência tanto para coagulante primário, quanto para auxiliar de coagulação junto ao tanino (SANGUI *et al.*, 2005). Em outra situação, a *S. obtusifolia* foi investigada como coagulante primário, também no tratamento de águas residuais, desta vez, proveniente de efluentes da indústria do papel, buscando remover sólidos suspensos e reduzir a demanda química de oxigênio. Foram obtidos resultados de remoção de 86,9 e 36,2%, respectivamente (SUBRAMONIAN *et al.*, 2014; OLADOJA, 2015).

QUADRO 4 - Relação de polímeros naturais de origem vegetal, ação estudada e seus respectivos empregos

Espécie	Ação	Emprego	Fonte
Batata, milho, arroz e trigo (amido vegetal)	Auxiliar de floculação	Tratamento de água para abastecimento; tratamento de efluentes (agroindústria, etc.)	[1,2]
<i>Abelmoschus</i> ou <i>Hibiscus esculentus</i>	Auxiliar de floculação e filtração	Tratamento de água para abastecimento; Tratamento de efluentes	[2,3]
<i>Acacia mearnsii</i>	Coagulante primário; auxiliar de floculação	Tratamento de água para abastecimento; tratamento de efluentes; acondicionamento de lodo	[2,5,6]
<i>Aesculus hypocastanum</i>	Coagulante primário	Clarificação de água	[1]
<i>Castanea sativa</i>	Coagulante primário	Clarificação de água	[3]
<i>Annona diversifolia</i>	Coagulante primário	Tratamento de efluentes domésticos	[1,7]
<i>Brassica sp.</i>	Coagulante primário	Tratamento de água para abastecimento	[8]
<i>Cactus latifaria</i>	Coagulante primário	Clarificação de água	[9]
<i>Cereus jamacaru</i>	Auxiliar de floculação	Clarificação de água	[4]
<i>Ipomoea dasysperma</i>	Coagulante primário; auxiliar de floculação	Tratamento de efluente de indústria têxtil;	[2]
<i>Moringa oleifera</i>	Auxiliar de filtração; Coagulante primário	Tratamento de água para abastecimento;	[2,10, 11]
<i>Ocimum basilicum</i>	Coagulante primário; auxiliar de floculação	Tratamento de efluente de indústria têxtil;	[1,12]
<i>Opuntia ficus indica</i>	Coagulante primário	Tratamento de água para abastecimento	[1]
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Coagulante primário	Clarificação de água	[2,13]
<i>Prosopis juliflora</i>	Coagulante primário	Clarificação de água	[2]
<i>Quercus robur</i>	Coagulante primário	Clarificação de água	[2]
<i>Sterculia lychnophora</i> ; <i>Scaphium lychnophorum</i> ; <i>Scaphium macropodium</i>	Coagulante primário	Clarificação de água; Clarificação de efluentes	[1,2,14]
<i>Strychnos potatorum</i>	Auxiliar de floculação	Clarificação de água	[2]

Fonte: [1] Oladoja (2015); [2] Lima (2007); [3] Anastasakis *et al.* (2009); [4] Zara *et al.* (2012); [5] Trevisan (2014); [6] Ozakar e Sengil (2003); [7] Torres, Carpinteyro-urban e Corzo-rios (2013); [8] Pritchard *et al.* (2009); [9] Sangui (2006); [10] Miller *et al.* (2008); [11] Ortiz, Astudillo e García, (2013); [12] Antov, Šćiban e Petrović (2010); [13] Díaz *et al.* (1999); [14] Yin (2010).

3.2.4 Pesquisas sobre polímeros vegetais no tratamento de água

Dada a amplitude de investigação dos polímeros vegetais na coagulação, cabe ressaltar seu papel no tratamento de água. Há relatos para remoção de turbidez e cor com diferentes polímeros, estudados em águas de mananciais, bem como águas sintéticas com turbidez e/ou cor adicionadas.

Díaz *et al.* (1999) analisaram a capacidade de duas espécies como coagulantes naturais para a remoção de turbidez de água sintética: as sementes de *Prosopis juliflora* e o *Cactus latifaria*. Verificou-se que ambos os vegetais foram eficientes tanto para águas de alta turbidez, quanto baixa (100-200 NTU e 30-40 NTU, respectivamente). Outra variável neste estudo foi a extração do polímero, a qual foi tratada de diferentes maneiras para as águas de estudo. No caso das sementes, as melhores remoções de turbidez foram as que utilizaram acetato de etila, enquanto, para o cacto, foi o éter de petróleo, indicando a atuação de compostos apolares no processo.

Com base no diagrama de coagulação, Costa (2001) testou o cloreto férrico e o sulfato de alumínio como coagulantes primários em conjunto com polímero natural proveniente do amido de mandioca como auxiliar de floculação. Verificou-se, em escala real, na ETA Morrinhos (Montes Claros, Minas Gerais) o desempenho do polímero vegetal, tal como estudado inicialmente em escala de bancada. Durante o período de teste, a qualidade da água bruta foi típica de períodos mais secos (turbidez de 6 uT, cor aparente de 12,5 uC, pH 8,0 e alcalinidade total de 184 mg/L de $CaCO_3$). O polímero natural (amido de mandioca) foi preparado a frio utilizando-se soda cáustica a 0,3 % (v/v). Em relação polímero natural, o autor obteve resultados significativos tanto no laboratório quanto em escala real, no que diz respeito à qualidade da água decantada, porém, no caso específico desta ETA, a utilização do polímero não foi considerada prioritária, frente aos resultados já satisfatórios obtidos apenas com o cloreto férrico.

A casca de banana (*Musa paradisiaca*) foi investigada no tratamento de água como auxiliar de floculação associado ao sulfato de alumínio. Oladoja e Aliu (2008) utilizaram seu extrato obtido após secagem na estufa, seguida de trituração, desidratação na mufla, diluição e filtração. O produto foi aplicado em águas sintéticas com turbidez variável de 50, 100 e 300 NTU, em diferentes pHs iniciais. Para 300 NTU e pH 4, foi obtida a melhor remoção de turbidez, enquanto a água de 50 NTU

apresentou um percentual de remoção de turbidez equivalente ao tratamento com o sulfato de alumínio somente.

Trevisan (2014) estudou o polímero natural Tanfloc® (produzido pela Tanac, a partir do tanino da *Acacia mearnsii*) como coagulante primário, em comparação ao sulfato de alumínio e cloreto férrico. Foram obtidas remoções de turbidez satisfatórias, porém reduzidas, diante do obtido pela ação dos coagulantes químicos. Em comparação a estes, o Tanfloc® não excedeu 20% de ganho em eficiência, mas, tendo ela sido verificada, foi demonstrado o potencial coagulante do vegetal. O estudo justificou que, dada a qualidade da água bruta, de alta turbidez (em torno de 377 NTU, porém variável ao longo dos experimentos devido ao tempo de armazenamento) e a dosagem dos coagulantes químicos, o mecanismo de varredura foi predominante, enquanto o polímero orgânico apresentou adsorção e formação de pontes.

No que tange às cactáceas, Zara *et al.* (2012) investigaram o mandacaru (*Cereus jamacaru*) para o tratamento de água para abastecimento. O cacto foi testado como auxiliar de floculação junto ao sulfato de alumínio. Os ensaios, em escala de bancada, consideraram uma dosagem arbitrária de auxiliar de coagulação natural a partir de extratos obtidos com metodologias diferentes: pó diluído em ácido clorídrico, hidróxido de sódio, cloreto de sódio e água destilada. Os resultados expuseram eficiência, contudo, o aumento na remoção de turbidez não superou 5% se comparados à dosagem ótima quando utilizado apenas o sulfato de alumínio.

Os cactos do gênero *Opuntia* (anteriormente tratados como *Nopalea* na taxonomia) têm sido explorados e vêm apresentando relatos de potencial para a coagulação. No Brasil, há diversas espécies naturalizadas, sendo um cacto com ocorrência confirmada nas regiões Nordeste (onde é conhecido como “palma forrageira”), Sudeste e Sul do Brasil (ZAPPI *et al.*, 2015).

Miller *et al.* (2008) trabalharam com diferentes formas de processamento da *Opuntia ficus indica*, visando clarificar águas sintéticas com diferentes características iniciais (em termos de turbidez e pH). Independente da turbidez da água bruta, isto é, fosse ela alta ou baixa, foram obtidas remoções de até 99%. Já estudos com a *Opuntia dillenii* demonstraram que a cactácea foi capaz de remover sólidos suspensos com eficiência de mais de 95% em águas de alta turbidez (entre 186 e 418 NTU) e apresentou remoção de cor entre 67 e 94%. (NOUGBODÉ *et al.*, 2013).

Não há, porém, muitas pesquisas considerando o uso de coagulantes vegetais e seus derivados voltadas para a realidade de ETAs, de modo a proporcionar uma

noção mais clara de viabilidade técnica (COSTA *et al.* 2016). Além disso, a eficiência dos polímeros naturais depende do tipo de água, do tipo de polímero, do tipo de coagulante (no caso de investigação do polímero como auxiliar de floculação) e do mecanismo de coagulação com o qual se pretende trabalhar (COSTA, 1992).

Em uma investigação utilizando água que abastece a ETA Rio das Velhas (Nova Lima, Minas Gerais), a *Opuntia cochenillifera* foi apresentada como potencial auxiliar de floculação para água bruta com baixa turbidez. Costa *et al.* (2014) relataram eficiência de aproximadamente 100% no tratamento de água com 9,64 NTU de turbidez, tendo utilizado a cactácea como auxiliar de floculação do sulfato ferroso clorado, em avaliação em escala de bancada. No referido estudo, o uso do coagulante químico em baixa turbidez gerou uma turbidez remanescente de 8,64 NTU, não tendo apresentado uma remoção satisfatória. O uso da cactácea como auxiliar de floculação, contudo, favoreceu a clarificação da água, na medida em que foram obtidos dados de turbidez próximos de zero.

Deste modo, diante do potencial exposto principalmente para as cactáceas, a *Opuntia cochenillifera* apresenta-se como uma espécie a ser estudada em configurações diferenciadas de trabalho, permitindo compreender os mecanismos de coagulação com os quais melhor atua, bem como a eficiência que é capaz de promover. Tal estudo é encorajado para águas brutas com diferentes características, bem como o uso da cactácea associado a coagulantes primários diversos.

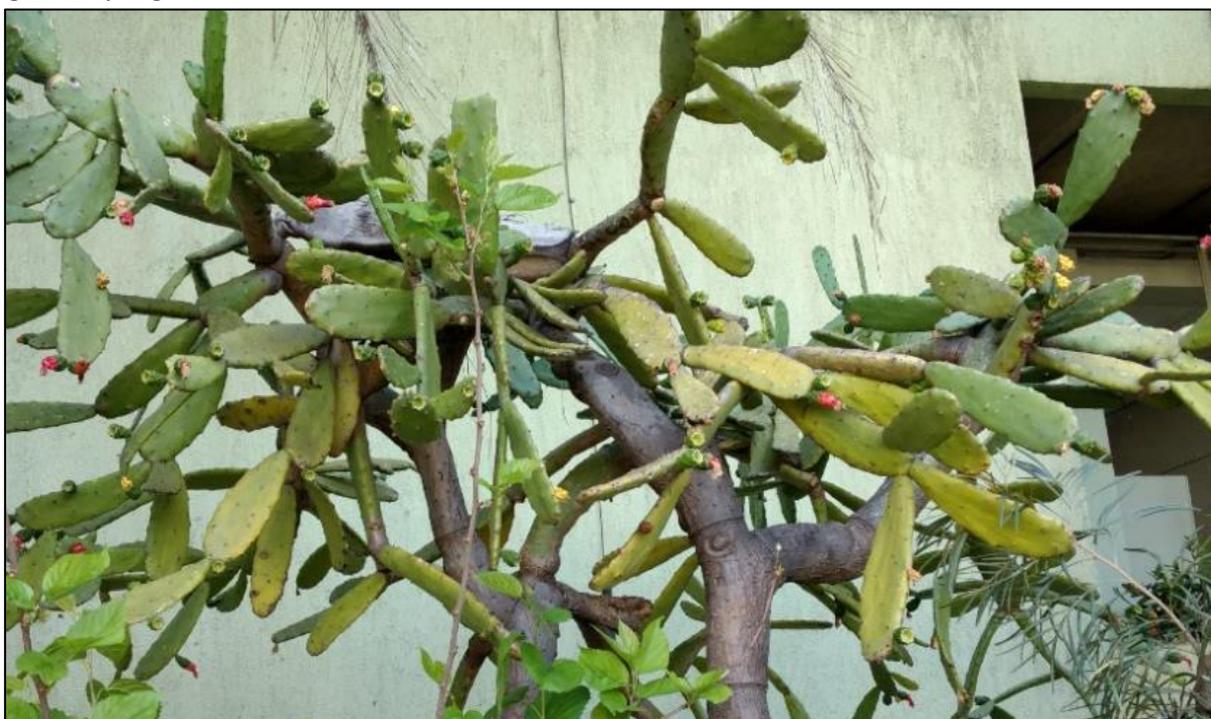
4 METODOLOGIA

Este trabalho envolveu procedimento experimental em escala de bancada, realizado no laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, localizado no Campus I do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG), em Belo Horizonte. Os ensaios de caracterização da *Opuntia cochenillifera* foram conduzidos no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Química, também no CEFET/MG.

4.1 Processamento da cactácea

Os exemplares de *Opuntia cochenillifera* foram obtidos nas instalações do campus I do CEFET/MG, em Belo Horizonte (FIGURA 2). Os procedimentos adotados para o preparo dos extratos vegetais basearam-se principalmente em Miller *et al* (2008).

FIGURA 2 – Exemplar de *Opuntia cochenillifera* utilizada, localizada no campus I do CEFET/MG



Fonte: Autor

Os cladódios foram cortados em tiras de aproximadamente 1 cm de largura, tendo sido então pesados em uma balança analítica da marca Shimadzu AY220, a

qual é apropriada para uso até 3200 gramas. A fim de remover a umidade do cacto, as tiras foram aquecidas a 60°C em estufa com circulação de ar (marca Marconi) durante o período de 36 horas, reduzindo a possibilidade de modificar princípios ativos dos polímeros durante a secagem.

Obtido o peso seco, o produto foi processado com o auxílio de liquidificador doméstico sob potência de 300 W durante 5 minutos. O pó foi peneirado com coador de uso doméstico com tela de nylon e diâmetro de abertura de aproximadamente 1 mm. Tal produto foi utilizado para posterior preparo das soluções coagulantes em diferentes concentrações.

4.2 Espectro infravermelho da *Opuntia cochenillifera*

O objetivo da espectroscopia de absorção no infravermelho (IV) é a determinação dos grupos funcionais de um dado material, visto que cada tipo de ligação se refere a um dado grupo, absorvendo uma frequência característica (SILVERSTEIN, 2006). Este ensaio, também tratado como FTIR, do inglês, *Fourier transform infrared spectroscopy*, permite, portanto, expor propriedades de um dado material a partir dos grupos funcionais nele identificados.

Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram obtidos a partir do equipamento da marca Shimadzu, modelo IRPrestige-21. Para o preparo da amostra, utilizou-se brometo de potássio (KBr) para formação de pastilha. As análises de FTIR foram realizadas tanto para a *Opuntia cochenillifera* em pó (triturado bruto), quanto para sua fração solúvel. Esta segunda foi obtida a partir da diluição do pó em água destilada, misturada em agitador magnético com bandeja aquecida para 30°C (marca Nova Ética) e posterior filtração por meio de papel de filtro de uso doméstico, representando o que foi realizado para a obtenção de seu extrato.

4.3 Soluções de cactácea para auxiliar de floculação

Foram realizados testes preliminares para verificar a concentração de trabalho adequada para a *Opuntia cochenillifera*. Considerando a liberação excessiva de mucilagem, a qual prejudicava a confecção de uma solução estoque, foi necessário o preparo de soluções individuais para cada concentração em estudo, antes dos testes de jarros.

Trabalhou-se com uma cuba referente à ausência de cactácea, isto é, aplicação exclusiva de coagulante químico, e as demais contiveram as dosagens de 1×10^3 mg/L, $1,5 \times 10^3$ mg/L, 2×10^3 mg/L e $2,5 \times 10^3$ mg/L. Estas foram obtidas através da pesagem do conteúdo triturado bruto em balança analítica (modelo AD200 da marca Marte, para pesagem de até 210 g) e diluição destas dosagens em soluções concentradas de 50 mL de água destilada, conforme exposto na *TABELA 1*.

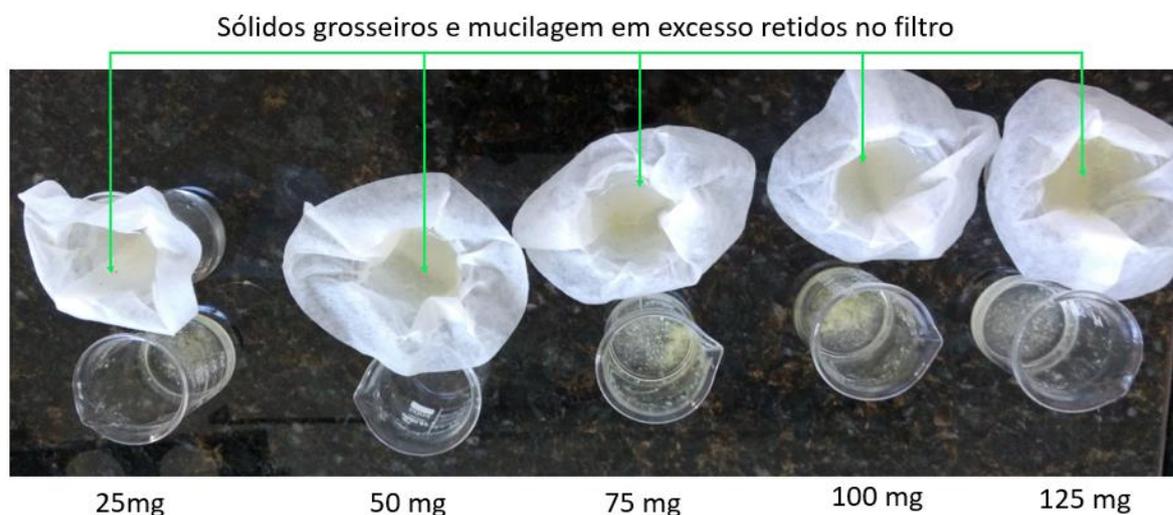
As soluções foram homogeneizadas com agitador com chapa aquecida a 30°C (marca Nova Ética) para facilitar a extração. Em seguida, realizou-se filtração das soluções em papel de filtro de uso doméstico, a fim de remover sólidos e mucilagem em excesso (FIGURA 3). No teste de jarros, foram aplicadas alíquotas de 10 mL do filtrado correspondentes a cada dosagem de cactácea.

TABELA 1 - Triturado bruto de *Opuntia cochenillifera* (mg) diluído em 50 mL de água destilada para obtenção das concentrações de trabalho

Triturado bruto de cactácea (mg)	Concentração obtida (mg/L)
0	-
25	5×10^2
50	1×10^3
75	$1,5 \times 10^3$
100	2×10^3
125	$2,5 \times 10^3$

Fonte: Autor

FIGURA 3 - Filtração da *Opuntia cochenillifera* após diluição do conteúdo em mg em 50 mL de água destilada



Fonte: Autor

4.4 Solução de coagulante químico

O coagulante químico adotado foi o cloreto férrico ($FeCl_3$), o qual foi preparado conforme solução de trabalho utilizada na ETA – Rio das Velhas, isto é, 0,2% p/v de Fe_2O_3 (2000 mg de Fe_2O_3 em 1000 mL de água destilada). Esta baseou-se na diluição do produto cedido pela COPASA, com densidade 1,49 kg/L e concentração média de 17% de Fe_2O_3 , conforme especificações fornecidas pelo fabricante e confirmadas pela companhia de saneamento.

Multiplicando-se a densidade do produto pelo teor de Fe_2O_3 , tem-se que, em 1 litro do produto, há 253300 mg de Fe_2O_3 , logo, 2000 mg estão contidos em 7,9 mL do produto. Foram, portanto, pipetados 7,9 mL do cloreto férrico fornecido e este conteúdo foi despejado em um balão volumétrico, o qual completou-se com água destilada até o menisco referente a 1000 mL.

Da solução de trabalho, foi possível afirmar que cada 1 mL da solução corresponde a 2 mg de Fe_2O_3 . Para aplicar uma dosagem de, por exemplo, 10 mg/L de Fe_2O_3 nas cubas do jarreste, com capacidade de 2 L cada, deve-se pipetar 10 mL de solução. Ressalta-se que a solução foi mantida sob refrigeração e utilizada todos os dias por um período de aproximadamente duas semanas.

4.5. Coleta e caracterização da água bruta

A água bruta utilizada nos ensaios de bancada foi proveniente do ponto de captação da Estação de Tratamento de Água do Rio das Velhas (ETA - Rio das Velhas), da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). Foram obtidos dados da água afluyente à ETA e a turbidez e pH foram aferidos novamente antes de cada ensaio jarreste. A TABELA 2 apresenta as informações obtidas na Estação.

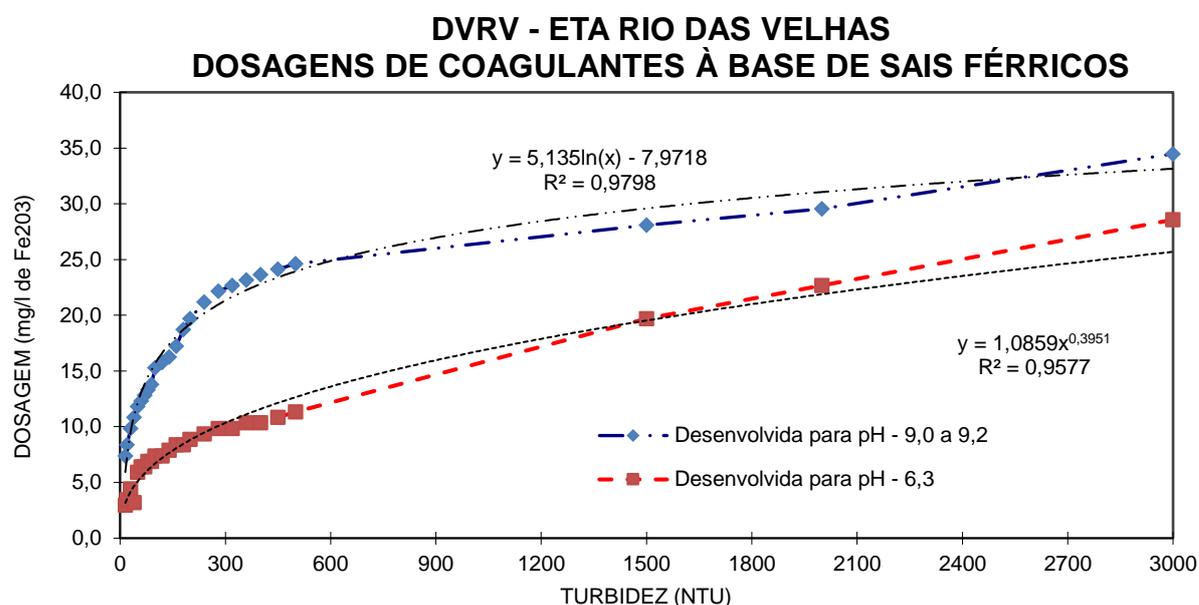
TABELA 2 – Parâmetros da água bruta coletada no manancial Rio das Velhas, no ponto de captação da COPASA

Parâmetro	Valor	Unidade
Turbidez	237,0	NTU
pH	7,2	-
Cor aparente	750	uC
Cor real	40	uC

Fonte: COPASA – Comunicação pessoal (2016)

Considerando a turbidez da água bruta, a dosagem de coagulantes à base de sais férricos na ETA – Rio das Velhas seria em torno de 12 mg/L de Fe_2O_3 , conforme gráfico de trabalho fornecido pela COPASA-MG e comunicação pessoal com os operadores da ETA. As curvas de dosagem são apresentadas na FIGURA 4. Na Estação, ocorre ajuste de pH por meio da adição de cal como agente alcalinizante, a qual também foi cedida pela COPASA para os ensaios de bancada.

FIGURA 4 - Gráfico de dosagem de sais férricos da ETA Rio das Velhas



Fonte: COPASA-MG – Comunicação pessoal (2016)

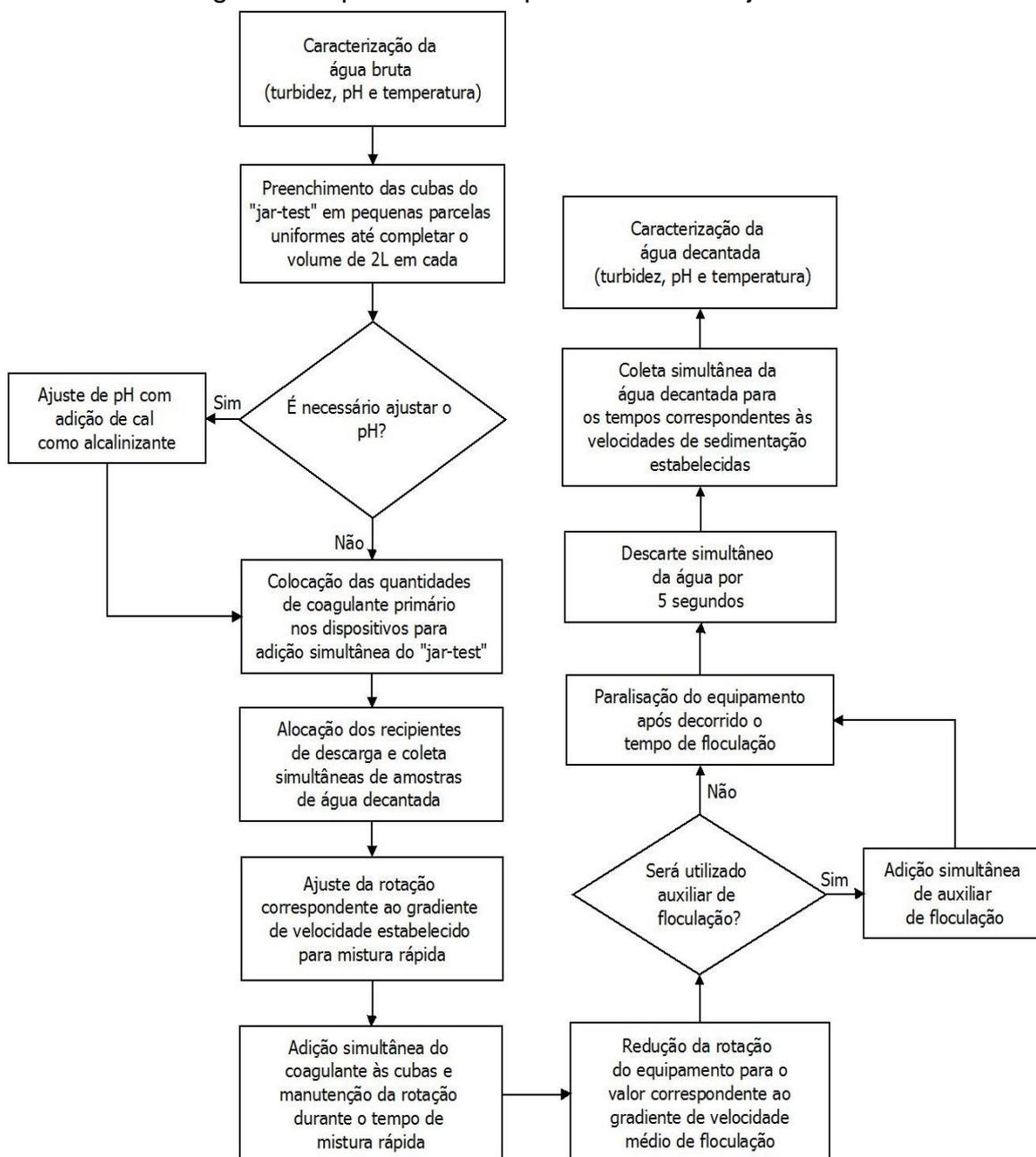
Vale ressaltar que o transporte e armazenamento da água bruta utilizada foram feitos em galões de 40 litros, hermeticamente fechados. Antes de cada ensaio jarteste, o conteúdo era agitado e vertido em um balde de 100 litros, de modo a homogeneizar o líquido e evitar sedimentação dentro do recipiente.

4.6 Ensaios de jarteste

Em busca de avaliar a aplicação de um dado coagulante ou auxiliar de floculação, devem ser consideradas as variáveis envolvidas na coagulação, dentre as quais destacam-se as características da água a ser tratada e o pH (RICHTER, 2009). A resposta a esses parâmetros deve ser avaliada a partir de ensaios jarteste cujo método é genericamente apresentado no fluxograma da FIGURA 5.

O equipamento adotado na realização dos ensaios de bancada foi um agitador jar-teste da Nova Ética, com controle de rotação por tacômetro digital, dispositivos para adição simultânea de produtos químicos (coagulantes, alcalinizantes, etc), bem como a extração simultânea de amostras. Utilizou-se um cronômetro digital para determinar os tempos correspondentes às etapas de mistura rápida e floculação, e também os tempos de coleta para cada velocidade de sedimentação estabelecida.

FIGURA 5 - Fluxograma do procedimento para o ensaio de jar-teste



Fonte: Adaptado de Di Bernardo e Centurione Filho (2002) e Bof (2007).

Os parâmetros adotados nos ensaios jarteste são função das características da água bruta e objetivos pleiteados (BOF, 2007; DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002). A TABELA 3 lista os valores adotados para cada parâmetro na realização dos ensaios para o presente trabalho.

TABELA 3 - Parâmetros adotados no ensaio de jarteste

Parâmetro	Valor	Unidade
Tempo de mistura rápida	30	s
Gradiente médio de velocidade da mistura rápida	600	s^{-1}
Tempo de floculação	30	min
Gradiente médio de velocidade de floculação	30	s^{-1}
Tempo de descarte	5	s
Velocidades de sedimentação	2,0, 0,7 e 0,35	cm/min

Fonte: Autor

Ressalta-se que os gradientes de velocidade para mistura rápida e floculação corresponderam a rotações de 300 e 40 rpm, respectivamente, conforme curva característica do equipamento, fornecida pelo fabricante. As velocidades de sedimentação corresponderam aos tempos de coleta iguais a 3,5, 10 e 20 minutos, respectivamente.

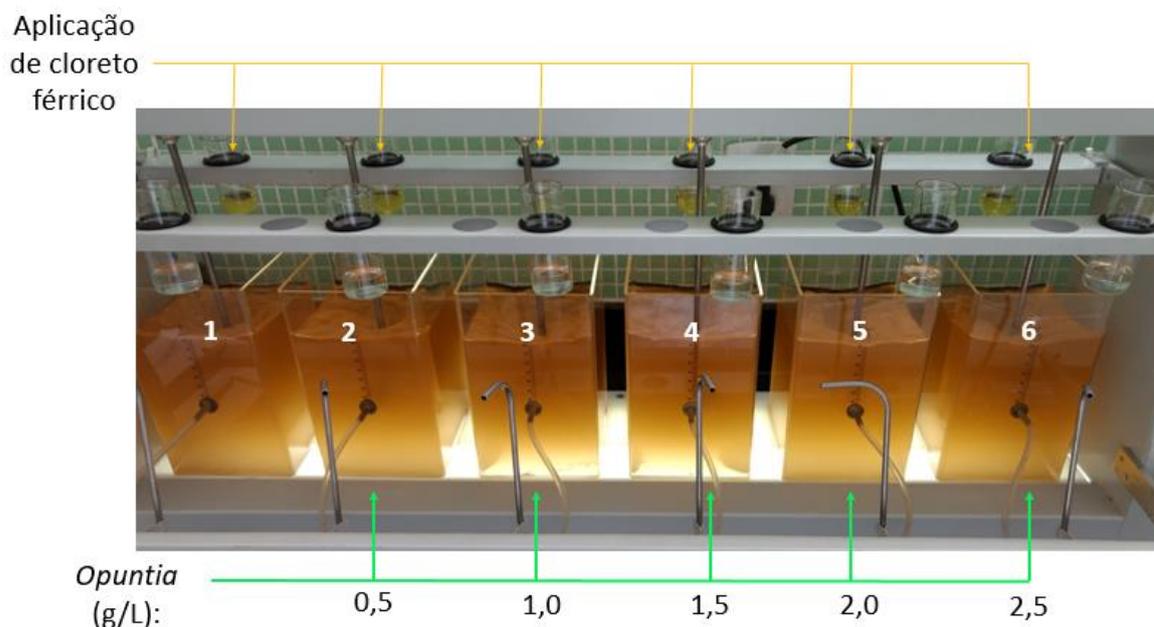
Os ensaios de jarteste consideraram a ausência de cactácea na cuba I e as dosagens de 5×10^2 mg/L, 1×10^3 mg/L, $1,5 \times 10^3$ mg/L, 2×10^3 mg/L e $2,5 \times 10^3$ mg/L para as demais cubas do equipamento. A cuba I, no caso, foi tratada como “cuba controle”, na qual não houve adição de *Opuntia cochenillifera*, permitindo a comparação com a ação exclusiva do coagulante primário. A montagem geral do experimento é exibida na FIGURA 6.

Além das diferentes concentrações estudadas para a cactácea, verificou-se sua eficiência mediante inserção de variadas dosagens do cloreto férrico e diferentes pHs. A definição das dosagens de coagulante químico baseou-se em contato pessoal com os funcionários da Companhia de Saneamento e recomendações conforme a FIGURA 4 - Gráfico de dosagem de sais férricos da ETA Rio das Velhas.

Trabalhou-se inicialmente com a dosagem de cloreto férrico igual a 10 mg/L de Fe_2O_3 , isto é, 10 mL de solução de cloreto férrico a 0,2% (p/v) inserida em cada cuba durante o ensaio. Este valor foi arbitrado por ser abaixo do valor ótimo de 12 mg/L de Fe_2O_3 com a qual a COPASA opera, permitindo maior visibilidade da ação da *Opuntia*. Em seguida, baixou-se tal concentração para 5 mg/L e então para 2 mg/L de Fe_2O_3 ,

com o objetivo de reduzir gradualmente a influência predominante da ação do coagulante primário.

FIGURA 6 - Montagem geral do ensaio de jarteste



Fonte: Autor

Investigou-se o pH em torno de 7 (referente à água bruta) e, posteriormente o pH 9, obtido pela adição de aproximadamente 15 mL de cal a 2g/L em cada cuba do equipamento. Este último pH não foi considerado para a dosagem de 2 mL de cloreto férrico como coagulante primário, devido a limitações quanto a disponibilidade de água bruta.

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, a partir da qual calculou-se o desvio padrão, representado graficamente. Os resultados consideraram o valor médio dos dados de turbidez remanescente, convertidos para percentual de remoção, a partir do qual realizou-se estudo estatístico.

4.7 Caracterização das amostras

As amostras coletadas nos ensaios de jarteste para as velocidades de sedimentação 2,0, 0,7 e 0,35 cm/min, referentes aos tempos de coleta iguais a 3,5, 10,0 e 20,0 minutos, respectivamente, foram caracterizadas em termos de pH, temperatura e turbidez residual.

A turbidez das amostras foi determinada a partir de um turbidímetro HACH 2100AN. Salienta-se que a água bruta teve sua turbidez lida antes dos ensaios, em vista de comparar com os dados da estação, considerando o intervalo de tempo entre coleta e experimentos. Tanto o pH quanto a temperatura das amostras foram aferidos por meio de um pHmetro da marca Even, modelo PHS3E.

4.8 Estudo estatístico dos dados de remoção de turbidez

A análise de variância (ANOVA) consiste de um método estatístico que permite avaliar hipóteses sobre as médias e variâncias de conjuntos de dados. Deste modo, a ANOVA visa verificar se há diferença significativa entre as médias e se os fatores envolvidos exercem influência em alguma variável dependente (MONTGOMERY e RUNGER, 2006).

Combinado com a ANOVA, o teste de Tukey constitui um método estatístico que pode ser interpretado como a comparação das médias entre os diferentes grupos, com a variância entre todos os indivíduos dentro desses grupos. Este se baseia na mínima diferença significativa (MONTGOMERY e RUNGER, 2006).

A partir dos resultados obtidos nos ensaios em três repetições, utilizou-se o software Statística® 7.0 para a realização da ANOVA *one-way* (análise de variância para um fator) junto ao teste Tukey. Considerou-se a hipótese de que, dentro de cada tratamento, isto é, coleta da amostra clarificada em um tempo determinado, com uso de uma dada dosagem de cloreto férrico e pH, as concentrações de cactácea interferem nos resultados de remoção de turbidez.

Por fim, realizou-se ANOVA fatorial (*multi-way*), que engloba mais de um fator, para os dados referentes aos tratamentos considerando tempo de coleta igual a 3,5 minutos (velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min). O objetivo foi corroborar a hipótese de que os diferentes pHs interferiam significativamente na remoção de turbidez nas dosagens de cloreto férrico de 10 e 5 mL. Considerando estes dois fatores para a ANOVA, isto é, pH e dosagem de $FeCl_3$, agrupou-se os gráficos para cada concentração de cactácea aplicada, de modo a permitir uma visualização comparativa do efeito da aplicação das diferentes concentrações em cada cuba.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processamento do cacto para uso como auxiliar de floculação, verificou-se redução no peso dos exemplares de *Opuntia cochenillifera* em torno de 60%, após a desidratação em estufa. A

TABELA 4 apresenta o efeito da desidratação em termos de massa.

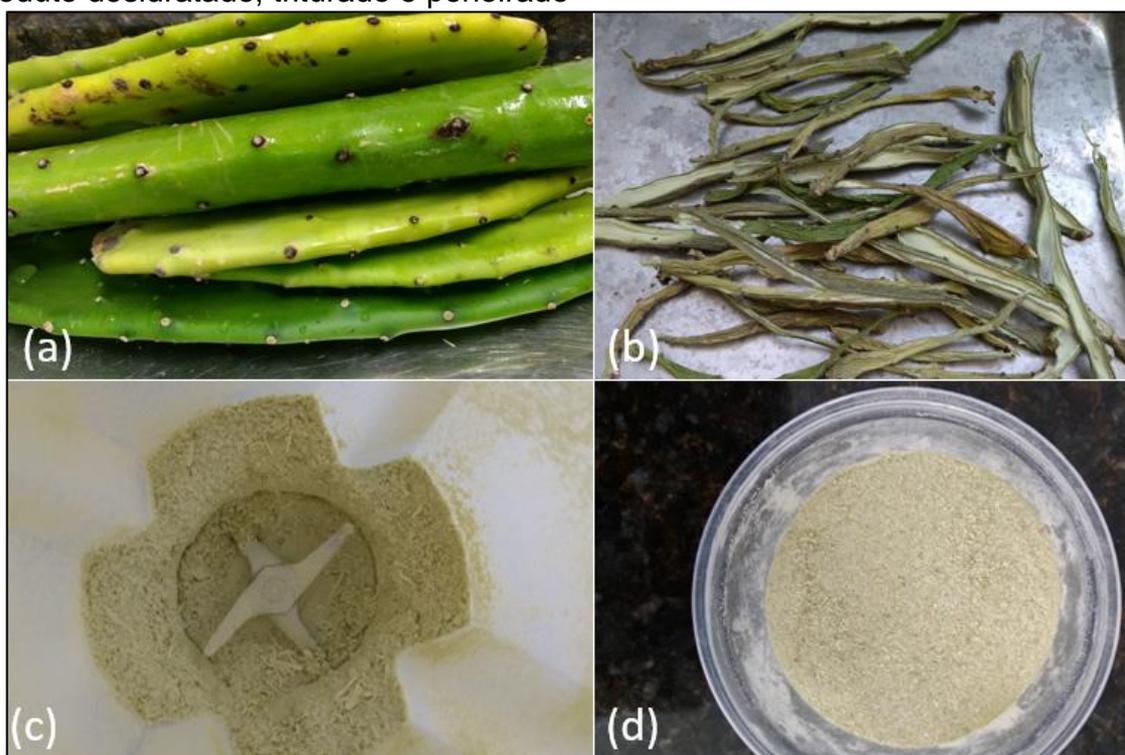
TABELA 4 - Balanço de massa do processo de secagem dos cactos

Itens	Massa (g)
Bandeja	353,81
Bandeja + cladódios	1054,74
Peso úmido dos cladódios	700,93
Bandeja + cladódios secos	426,95
Peso seco dos cladódios	273,98

Fonte: Autor

O refinamento da granulometria resultou em um peso seco, triturado e peneirado igual a 63,37 g, dadas as perdas de massa envolvida principalmente na transferência do material entre recipientes. A FIGURA 7 apresenta o aspecto dos cladódios antes e depois do período de 24 horas em estufa a 60°C.

FIGURA 7 - (a) Cladódios de *Opuntia cochenillifera*; (b) Aspecto do vegetal após 24 horas de secagem a 60°C; (c) Produto da trituração dos cladódios desidratados; (d) Produto desidratado, triturado e peneirado

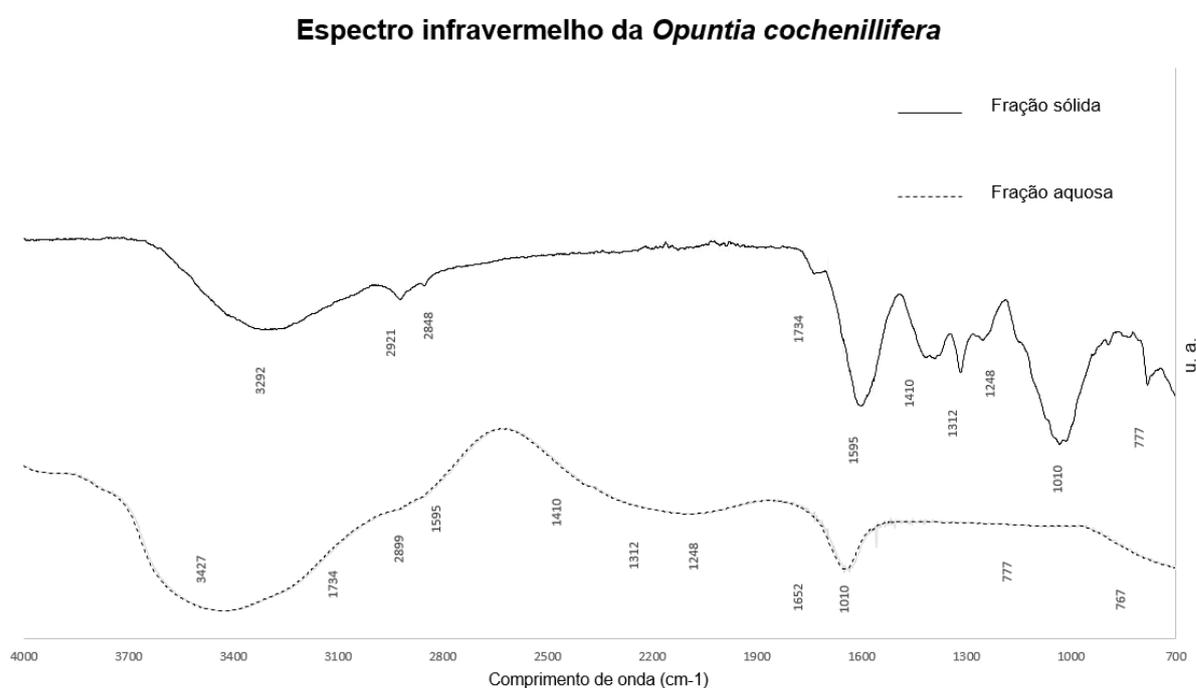


Fonte: Autor

5.1 Análise do espectro infravermelho da *Opuntia cochenillifera*

A partir dos dados de absorvância e transmitância, gerou-se o gráfico apresentado na FIGURA 8 para o cacto pulverizado seco, bem como sua fração solúvel, em estado aquoso. As relações com grupos funcionais foram avaliadas de acordo com Silverstein (2006), conforme TABELA 5, a qual apresenta as frequências de deformação de algumas ligações.

FIGURA 8 - Espectro infravermelho das frações sólida e aquosa da *Opuntia cochenillifera*



Fonte: Autor

TABELA 5 - Tipos de ligação em função da região de absorção no espectro infravermelho

Tipo de ligação	Região de absorção (cm ⁻¹)
C – C, C – O, C – N	1300 – 800
C=C, C=O, C=N, N=O	1900 – 1500
C≡C, C≡N	2300 – 2000
C – H, O – H, N – H	3800 - 2700

Fonte: Adaptado de Silverstein (2006)

A partir da FIGURA 8, observou-se uma banda significativa devido à sobreposição dos estiramentos O – H e N – H, em torno do comprimento de onda 3292 cm⁻¹ para a o cacto no estado sólido. No espectro da fração aquosa, por sua

vez, também se identificou tal região de absorção, porém não é possível inferir a presença de sítios ativos, tendo em vista a influência da hidroxila da água. Contudo, dada a similaridade das bandas identificadas, vale ressaltar que sítios N – H em amidas formam pontes de hidrogênio intermoleculares entre coagulantes e sólidos suspensos, auxiliando processos de coagulação (SUBRAMONIAN *et al.*, 2013). Além disso, o estiramento O – H de absorção na região entre 3300 e 2500 cm^{-1} está associado aos ácidos carboxílicos (SILVERSTEIN, 2006), cuja presença configura sítios de adsorção durante processos de coagulação que utilizam tal mecanismo (YIN, 2010). A confirmação de sua presença pode ser feita a partir de uma análise de acidez.

Ainda considerando a banda larga presente em ambos os espectros para o intervalo entre 3800 – 2700 cm^{-1} (FIGURA 8), é possível abordar a existência de C – H. As vibrações do tipo “dobramento” em hidrocarbonetos são características do grupo metileno, em torno de 1465 cm^{-1} , enquanto as do grupamento metil encontram-se na região do espectro próximas a 1375 cm^{-1} (SILVERSTEIN, 2006).

Os grupamentos metil e metileno podem ser características das unidades dos carboidratos, conforme ocorrido na caracterização do espectro infravermelho do extrato aquoso da *Senna obtusifolia* (anteriormente tratada como *Cassia obtusifolia* na taxonomia) em um estudo de Subramonian *et al.* (2014). Este investigou a atividade coagulante do vegetal em comparação ao sulfato de alumínio no tratamento de efluentes da indústria do papel.

No caso do espectro da *Opuntia cochenillifera*, contudo, observou-se absorção relevante dos comprimentos de onda referentes a estes grupamentos apenas na fração sólida da cactácea. Salienta-se que a filtração do extrato aquoso implicou considerável perda de massa e, além disso, retenção de parte da mucilagem, cujo conteúdo viscoso conduziu à rápida colmatação do filtro de papel. É possível, portanto, relacionar a menor absorção dos grupamentos de açúcares na fração solúvel à perda de tal constituinte durante o processamento da amostra utilizada para o FTIR.

5.3 Avaliação da aplicação de *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação

A TABELA 6 expõe os valores médios obtidos para pH em cada ensaio realizado em triplicata, de acordo com as dosagens aplicadas para o cloreto férrico e o pH inicial (referente à água bruta ou o pH ajustado). Verificou-se queda de pH promovida pela ação do cloreto férrico, de caráter ácido. Contudo, mesmo a adição

de cal para elevação do pH da água bruta para 9 não afetou significativamente o pH de coagulação. Assume-se que a dificuldade de elevar o pH tenha sido em função da alcalinidade presente, relacionada à capacidade tampão. A alcalinidade é uma determinação importante no controle do tratamento de água, estando relacionada com a coagulação, redução de dureza e prevenção de corrosão em tubulações (SPERLING, 2005).

A análise de variância para os dados de pH da água clarificada não indicou diferença significativa no que tange às concentrações de cactácea aplicadas, o que indica que a *Opuntia cochenillifera* não contribuiu para alterações no pH da água. Não houve alteração significativa em relação à temperatura e todo o experimento foi realizado em temperatura ambiente.

TABELA 6 - Efeito dos diferentes tratamentos sobre o pH

Dosagem de coagulante químico (mg/L de Fe_2O_3)	pH inicial	pH final
10	7	6,51±0,19
10	9	7,48±0,16
5	7	6,39±0,14
5	9	7,43±0,13
2	7	6,82±0,07

Fonte: Autor

A turbidez média baseada nas aferições que antecederam cada ensaio jarreste correspondeu a 161,60 NTU. Tal valor foi menor do que o obtido no campo no momento da coleta (237,00 NTU), devido a alterações na qualidade da água, considerando-se o transporte e tempo de armazenagem.

No que se refere aos resultados dos testes de jarros, os dados medidos para turbidez remanescente, convertidos em percentual de remoção, tiveram sua média aritmética apresentada graficamente junto às barras indicativas do desvio padrão para cada tratamento específico. Ratifica-se que, por tratamento, considerou-se a combinação dos fatores: tempo de coleta (representando a velocidade de sedimentação), dosagem de cloreto férrico, pH da água bruta e concentração de cactácea.

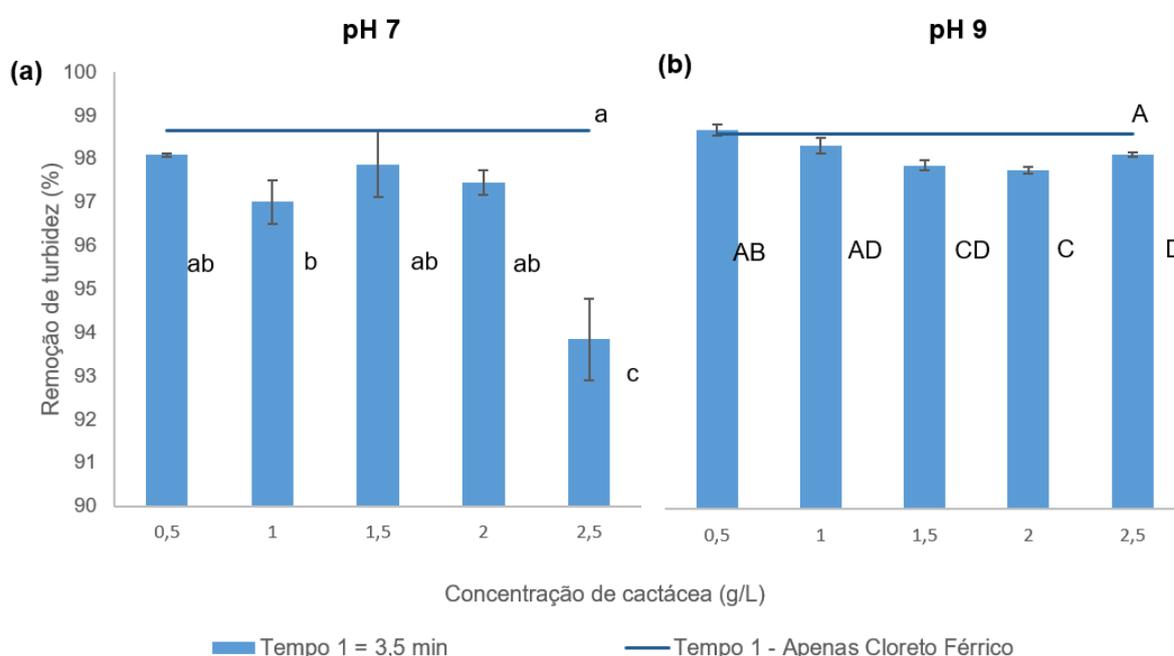
Nos gráficos, as velocidades de sedimentação 2,0, 0,7 e 0,35 cm/min são representadas em termos de tempo de coleta, correspondentes a 3,5 min, 10,0 min e

20,0 min, respectivamente. Valores identificados com letras diferentes indicam significâncias diferentes obtidas pelo teste Tukey realizado junto à ANOVA.

5.3.1 Resultados para dosagem de 10 mg/L de Fe_2O_3

As FIGURAS 9, 11 e 12 registram a remoção de turbidez para o tratamento referente à dosagem de 10 mg/L de Fe_2O_3 nos pHs 7 e 9. Cada FIGURA refere-se a um tempo de coleta, representando uma dada velocidade de sedimentação.

FIGURA 9 - Efeito da concentração de cactácea no tratamento com cloreto férrico a 10 mg/L de Fe_2O_3 , para (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min. (a) $F=26,26$ e $P>0,0001$ (b) $F=33,67$ e $P<0,0001$



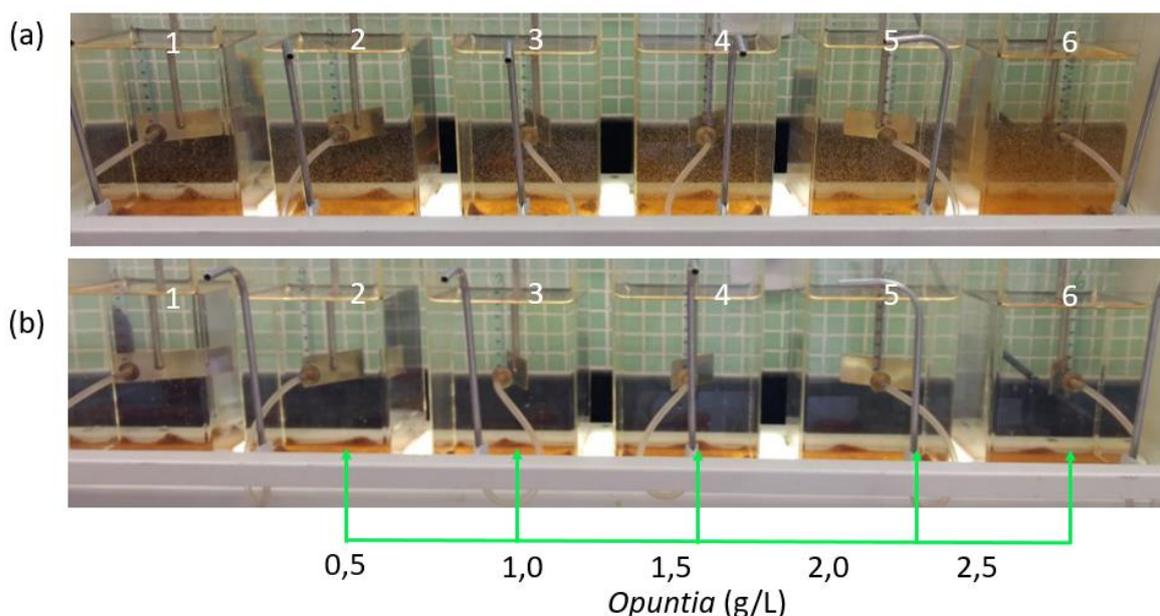
Fonte: Autor

A FIGURA 9 explicita que as diferentes concentrações de cactácea constituíram um fator significativamente relevante na remoção de turbidez. Os resultados da análise de variância sugeriram que as remoções para as concentrações de 5×10^2 , $1,5 \times 10^3$ e $2,0 \times 10^2$ mg/L foram iguais no pH 7 (FIGURA 9 (b)), para a dosagem de cloreto férrico de 10 mg/L de Fe_2O_3 . Contudo, nenhum dos resultados foi capaz de atingir a *baseline* referente à aplicação exclusiva de coagulante químico, sendo a concentração de $2,5 \times 10^3$ mg/L de *Opuntia* a mais distante de tê-lo feito. A FIGURA 10 corrobora tal inferência, na medida em que, ao fim da floculação, foi

possível observar que a maior parte dos flocos já havia se sedimentado para todas as concentrações de cacto, com exceção da cuba 6.

Quanto ao pH 9, representado pela FIGURA 9 (b), para dosagem de cloreto férrico de 10 mg/L, foram obtidas melhores remoções de turbidez para a aplicação de cactácea em geral (98,8%), se comparadas ao pH 7, que apresentou uma média de remoção de 96,8%. Entretanto, verificou-se que as remoções foram próximas à ação do cloreto férrico por si só e, além disso, abaixo da mesma. Novamente, houve a interferência significativa das concentrações de cactácea, do ponto de vista estatístico, mas não foi identificada melhora no tratamento em relação ao uso de apenas coagulante químico.

FIGURA 10 - Experimento com dosagem de cloreto férrico de 10 mg/L de Fe_2O_3 e pH 9 (a) ao fim da floculação; (b) ao fim da sedimentação



Fonte: Autor

A análise da FIGURA 11 (a) indica que, decorridos 10,0 minutos de sedimentação no aparelho jarteste, a remoção de turbidez para o pH 7, para a mesma dosagem de cloreto férrico, manteve o padrão de resultados em termos de influência da concentração de cactácea sobre a clarificação da água. Tal inferência baseou-se no teste Tukey, que sugeriu remoções iguais para as concentrações de 5×10^2 , $1,5 \times 10^3$ e $2,0 \times 10^3$ mg/L de cactácea, desta vez também associadas aos resultados com uso exclusivo do coagulante químico. A aplicação de *Opuntia cochenillifera* mais

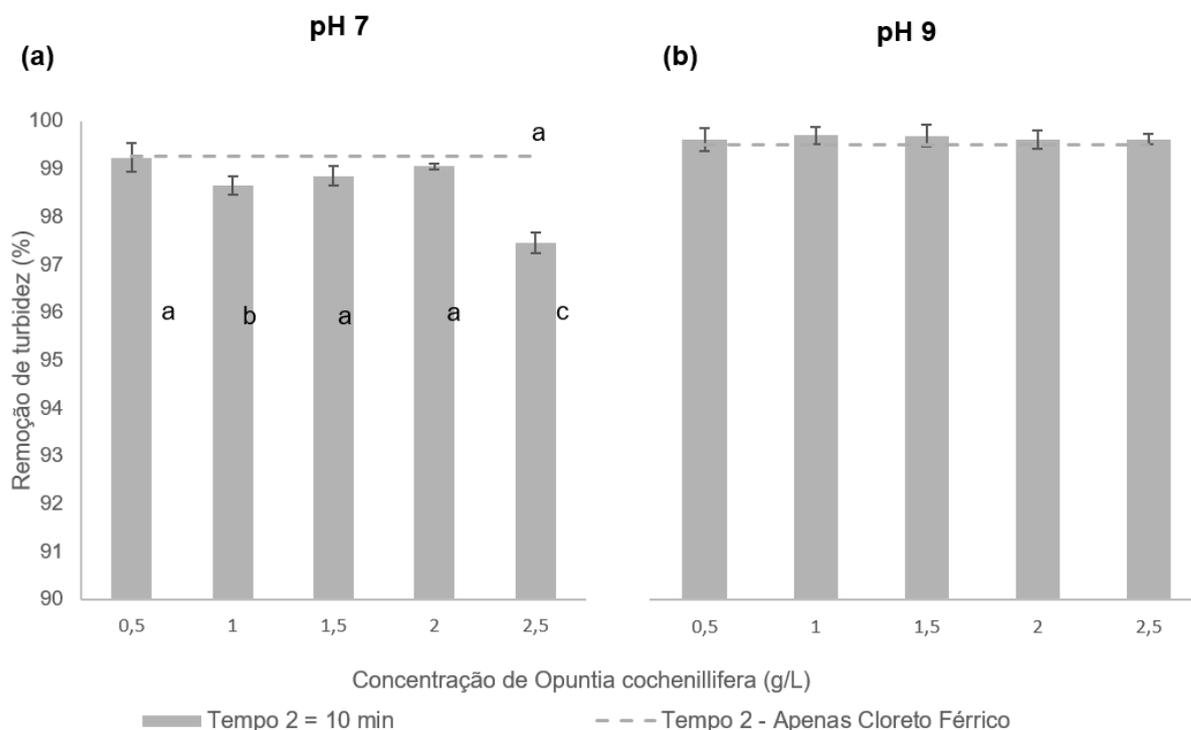
concentrada ($2,5 \times 10^3$ mg/L) manteve-se como significativamente diferente das demais, gerando menor remoção de turbidez.

O tratamento com pH 9 e 10 mg/L de Fe_2O_3 , representado na FIGURA 11 (b) não apresentou diferença significativa na remoção de turbidez em função da concentração, quando realizada a ANOVA. O resultado da análise de variância associa-se ao fato de a turbidez remanescente em todas as cubas ter sido próxima de zero, não permitindo conjecturas sobre o fator considerado na hipótese (a concentração de cactácea).

Assume-se a eficiência obtida para tal tratamento (10 mg/L de Fe_2O_3 e pH 9) ao fato de o cloreto férrico, ao ser adicionado a águas alcalinas, dissociar-se em íons cloreto e hidróxido de ferro III, apresentando uma carga positiva que atrai as partículas coloidais, permitindo a formação de flocos densos, que sedimentam com facilidade (OLADOJA e ALIU, 2008). Além disso, Miller *et al.* (2008) mostrou que a atividade coagulante da *Opuntia* spp. é maior em águas com pHs entre 8 e 10, mas os seus experimentos foram conduzidos com água turva sintética, não havendo nenhuma interação de sedimentos encontrados em águas de mananciais ou demais partículas orgânicas e inorgânicas, por exemplo.

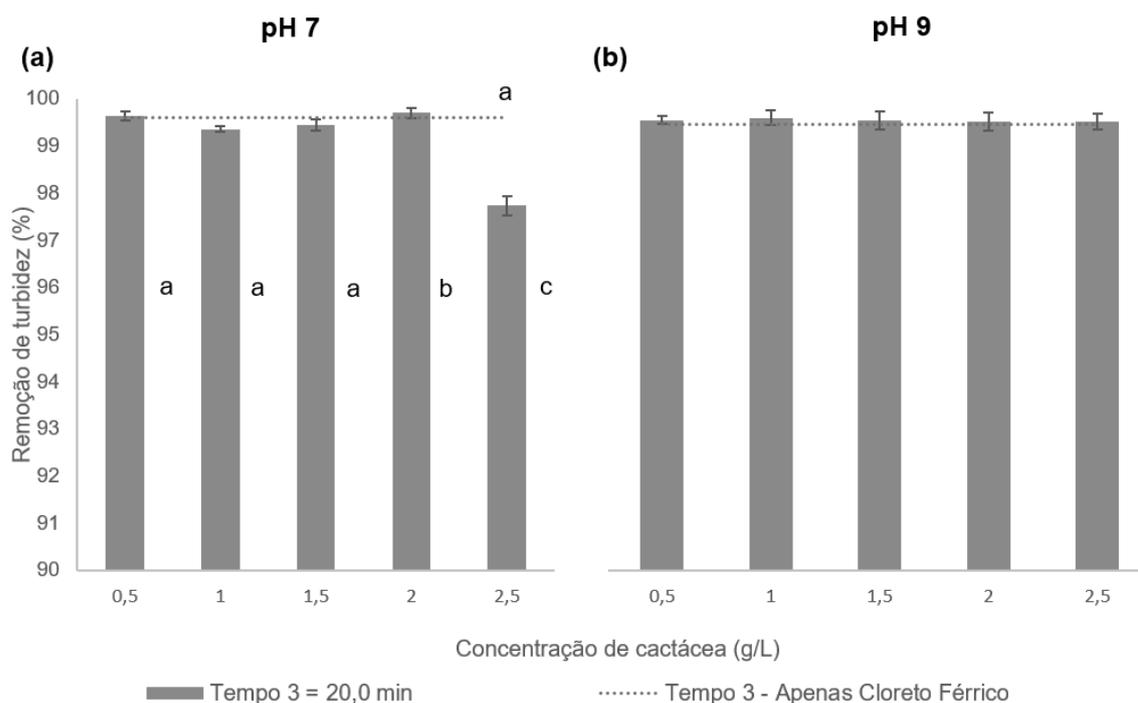
As implicações do tratamento repetiram-se para a velocidade de sedimentação igual a 0,35 cm/min, representada na FIGURA 12. Presume-se que as melhores remoções para esta velocidade, no pH 7, deram-se em função do favorecimento da sedimentação natural das partículas no tempo de 20,0 minutos. Para o pH 9, não houve diferenças significativas para as concentrações de cacto estudadas, por conta da remoção praticamente total da turbidez, já verificada para o tempo de coleta de 10,0 minutos (velocidade de sedimentação de 0,7 cm/min).

FIGURA 11 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 10 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,7 cm/min. (a) $F = 33,67$ e $P < 0,0001$; (b) Não foi significativamente diferente.



Fonte: Autor

FIGURA 12 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 10 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,35 cm/min. (a) $F=129,02$ $P < 0,001$; (b) Não foi significativamente diferente.



Fonte: Autor

5.3.2 Resultados para dosagem de 5 mg/L de Fe_2O_3

Os experimentos que consideraram a dose de cloreto férrico equivalente a 5 mL em cada cuba do jarreste, i. e. 5 mg/L de Fe_2O_3 , são exibidos nas FIGURAS 13, 15 e 16. Independentemente da velocidade de sedimentação, a análise dos três gráficos de remoção de turbidez indicou novamente maiores valores para o pH 9. De acordo com Oladoja e Aliu (2008), em águas de maior turbidez e pH, o mecanismo de coagulação predominante das partículas coloidais é a varredura. A dosagem de coagulante químico, mesmo após reduzida para 5 mg/L de Fe_2O_3 , foi, portanto, capaz de exercer a remoção das partículas coloidais da água. Cabe ressaltar que, segundo Di Bernardo (2003), o cloreto férrico, atuando como coagulante primário, apresenta resultados até mesmo melhores do que o do sulfato de alumínio, por exemplo, em águas de alcalinidade e pH mais elevados. Na presente situação, o uso de auxiliar de floculação não foi pertinente para melhorar sua eficiência, já suficiente.

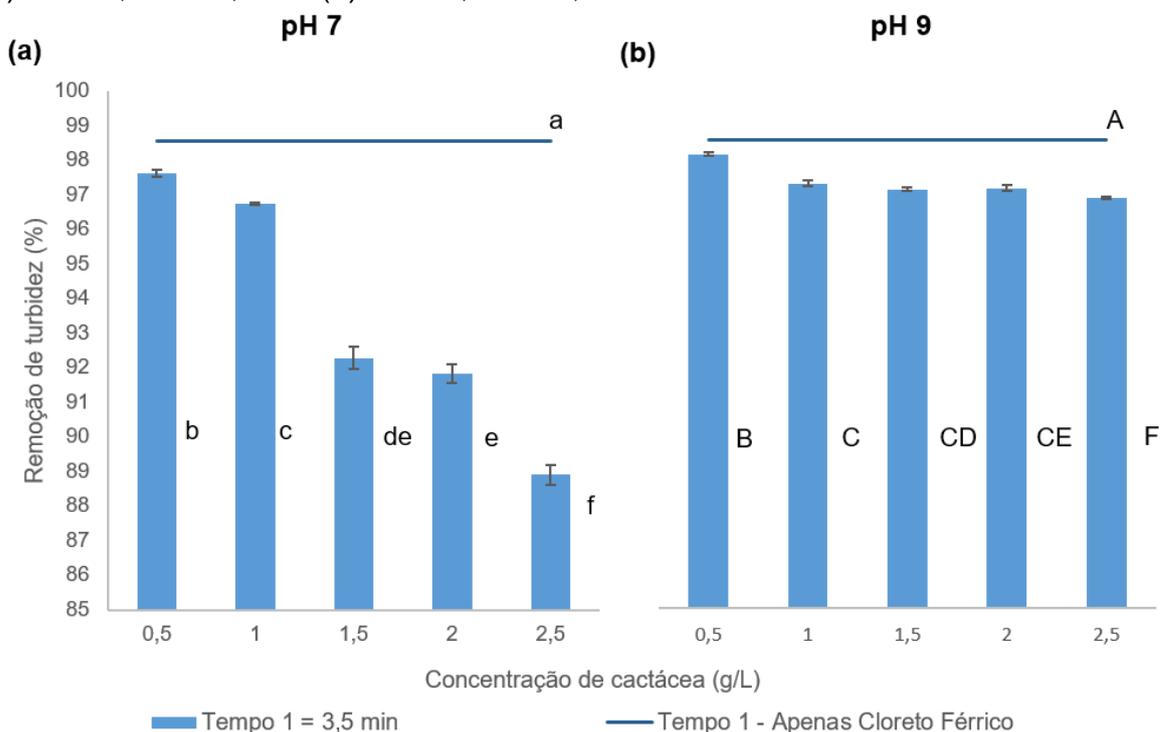
Enfatizando os resultados para o ensaio com pH 7, do ponto de vista estatístico, é possível inferir que diferentes concentrações de cactácea promoveram diferentes remoções de turbidez. Visualmente, a cuba que trabalhou com a maior concentração de *Opuntia cochenillifera* apresentou os resultados mais baixos de remoção (FIGURA 14), ratificando o ocorrido para os experimentos com 10 mg/L de Fe_2O_3 . Ainda considerando este tratamento, de acordo com a análise Tukey, nenhum resultado foi próximo ao obtido para o cloreto férrico somente, sendo todos os valores de remoção desfavoráveis, o que corrobora os relatos de que a ação do cloreto férrico é vantajosa para águas com estas características (OLADOJA e ALIU, 2008).

As menores velocidades de sedimentação, abordadas nas FIGURAS 15 e 16 também sugeriram, a partir da ANOVA, que as diferentes concentrações de *Opuntia* (em g/L) afetaram significativamente a clarificação da água. Isto foi mais evidente para o pH 7, novamente, do que no experimento com pH 9. Este segundo, exposto nas FIGURAS 15 e 16 (b) indicou, de acordo com o teste Tukey, que as remoções vinculadas a 5×10^2 e $1,0 \times 10^3$ mg/L de cactácea são estatisticamente iguais à remoção por cloreto férrico. Já as concentrações de $1,5 \times 10^3$, $2,0 \times 10^3$ e $2,5 \times 10^3$ mg/L, também estatisticamente iguais entre si, apresentaram remoções menores.

Para ambas as velocidades de sedimentação de 0,7 e 0,35 cm/min (tempos 1 e 2, respectivamente), foram notados melhores valores de remoção, tal como ocorrido com o cacto associado a uma dosagem maior de cloreto férrico, isto é, 10 mg/L de

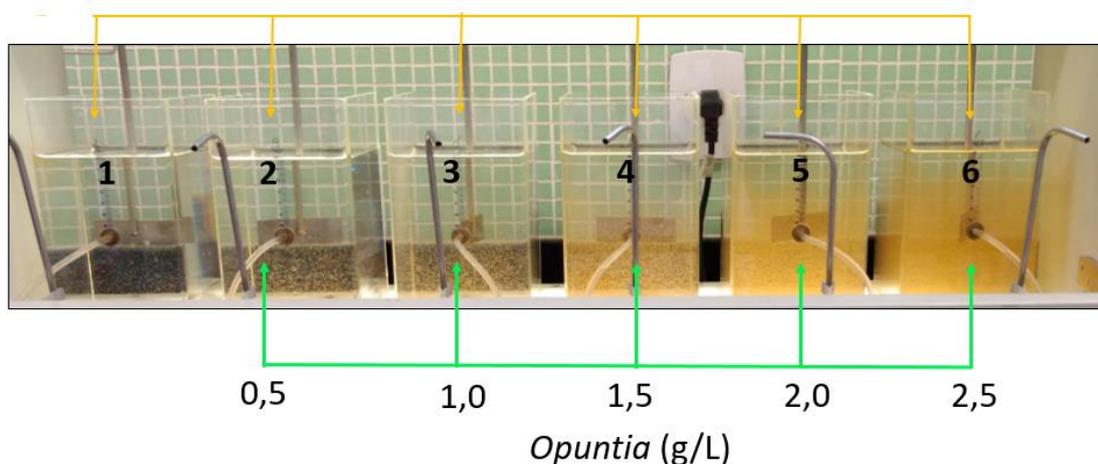
Fe_2O_3 . Novamente, infere-se que isso se deva à sedimentação favorecida pela quantidade maior de partículas em função da alta turbidez da água de estudo, bem como à eficiência do cloreto férrico como coagulante primário, não tendo havido melhora na remoção por parte da adição de polímero como auxiliar de floculação.

FIGURA 13 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 2,0 cm/min. (a) $F=956,44$ $P<0,0001$ (b) $F=324,44$ $P<0,0001$



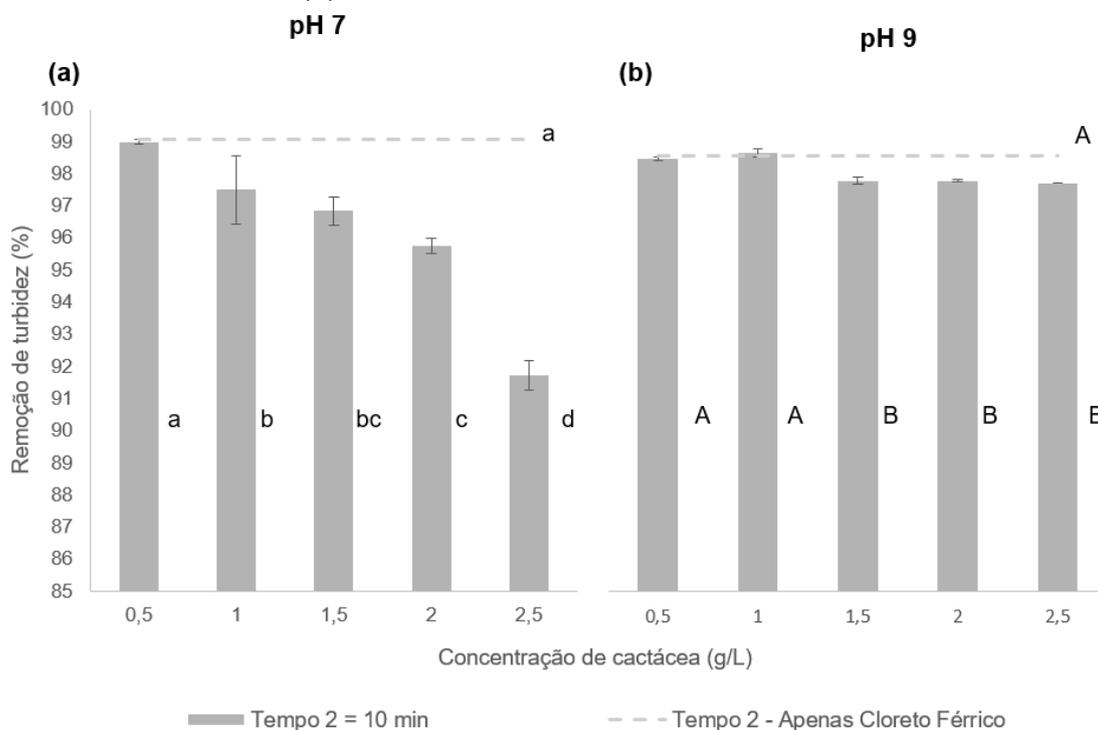
Fonte: Autor

FIGURA 14 - Sedimentação dos flocos no ensaio com 5 mg/L de Fe_2O_3 e pH 7



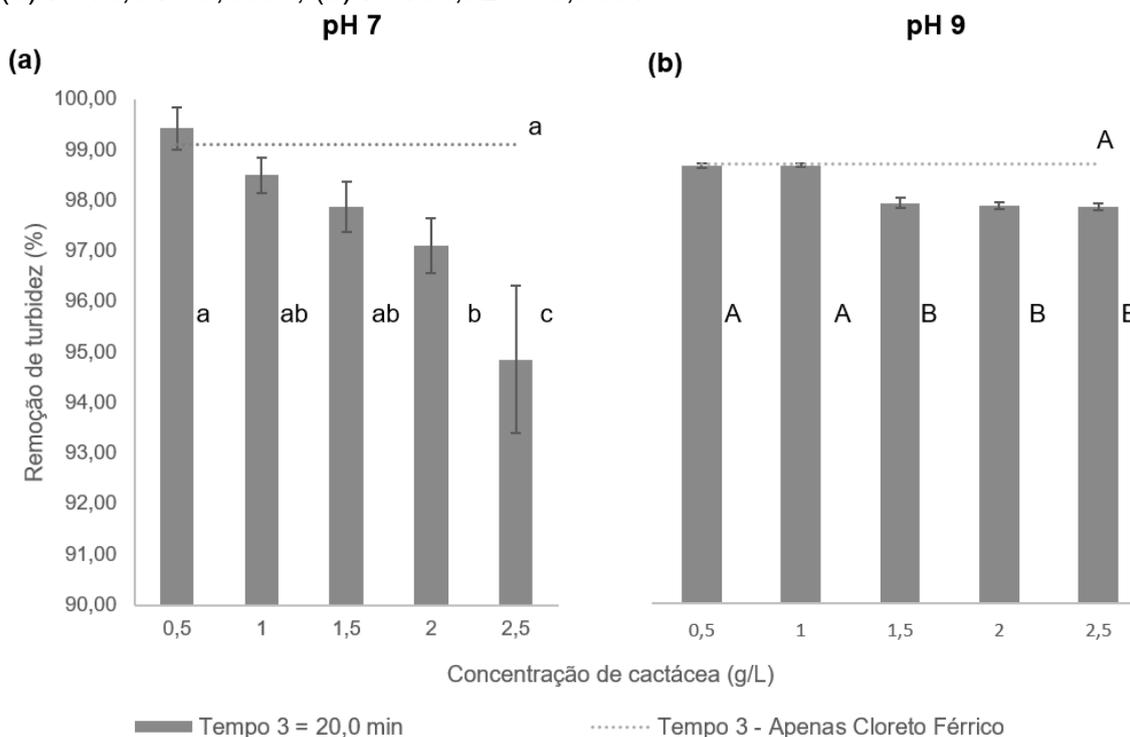
Fonte: Autor

FIGURA 15 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,7 cm/min. (a) $F=83,81$ $P<0,0001$; (b) $F=109,26$ $P<0,0001$



Fonte: Autor

FIGURA 16 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe_2O_3 em (a) pH 7 e (b) pH 9. Velocidade de sedimentação de 0,35 cm/min. (a) $F=16,9$ $P<0,0001$; (b) $F=154,62$ $P<0,0001$



Fonte: Autor

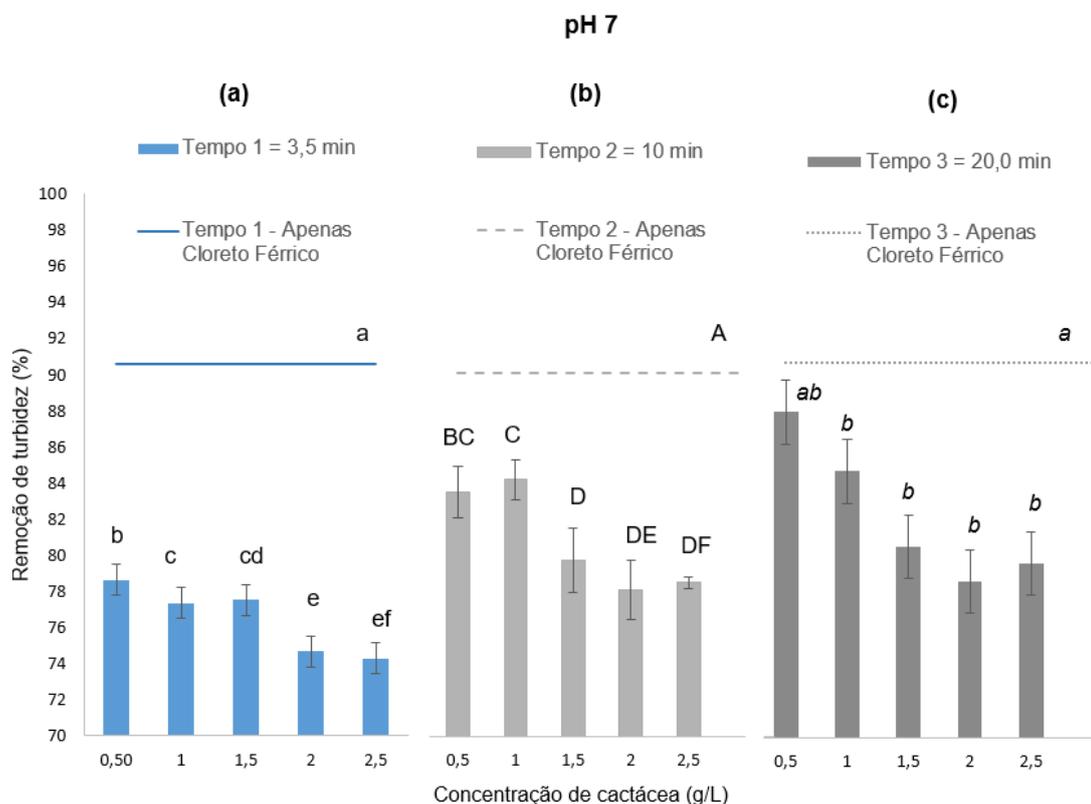
5.3.3 Resultados para a dosagem de 2 mg/L de Fe_2O_3

O experimento que considerou a dosagem de coagulante químico de 2 mg/L de Fe_2O_3 tem seus resultados apresentados na FIGURA 17, onde são exibidas as remoções de turbidez para todas as velocidades de sedimentação estudadas, em termos de tempo de coleta. Considerou-se, para este teste, apenas o pH 7.

A análise de variância para um fator indicou que a concentração de cactácea interferiu na remoção de turbidez para este tratamento. Porém, a análise do gráfico da FIGURA 17 permite verificar que nenhuma das cubas com *Opuntia cochenillifera* foi capaz de acompanhar a *baseline* de remoção do cloreto férrico em uso exclusivo.

Salienta-se que, para a velocidade de sedimentação de 0,35 cm/min (FIGURA 17 (c)), de acordo com o teste Tukey, pode-se assumir que os resultados para todas as concentrações de cactácea foram iguais, exceto para o menor valor, isto é, 5×10^2 mg/L (0,5 g/L). Este, ainda, apresentou remoção menor do que o uso de coagulante químico, sem adição de polímero como auxiliar de floculação.

FIGURA 17 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 2 mg/L de Fe_2O_3 em pH 7 nas velocidades de sedimentação (a) 2 cm/min, (b) 0,7 cm/min e (c) 0,35 cm/min. (a) $F = 785,26$ $P < 0,0001$; (b) $F = 40,69$ $P < 0,0001$; (c) $F = 18,62$ $P < 0,0001$

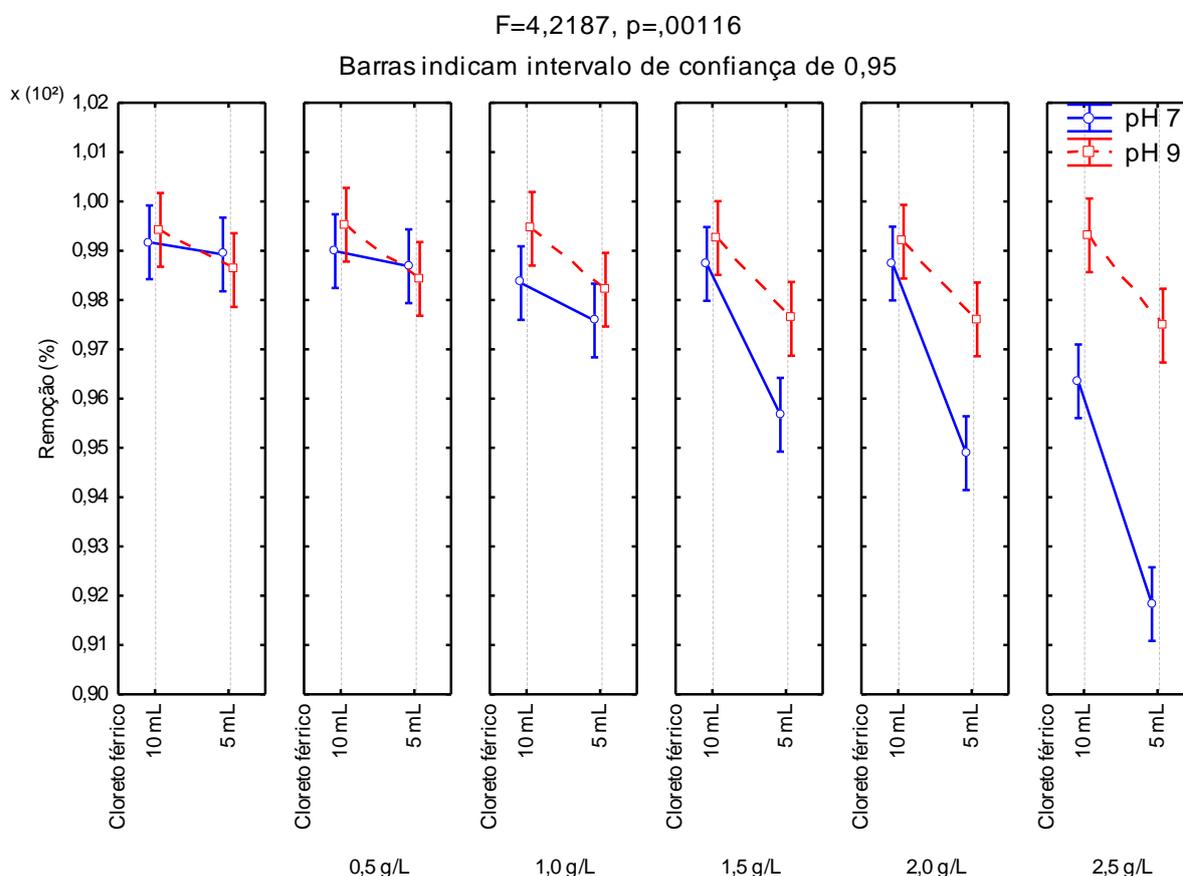


Fonte: Autor

5.3.4 Avaliação da influência do pH e concentração de coagulante químico a partir da ANOVA fatorial

O resultado obtido para a ANOVA fatorial é representado no gráfico da FIGURA 18. A partir desta, é possível verificar estatisticamente que a redução na dosagem de cloreto férrico (onde os valores em mL aplicados no jarrest correspondem à dosagem em termos de mg/L de Fe_2O_3), comprometeu de forma significativa a remoção de turbidez. Porém, sob perspectiva operacional, notou-se que, mesmo nas condições de pH e concentração mais desfavoráveis (excluindo-se o cloreto férrico a 2 mg/L de Fe_2O_3), as remoções obtidas foram de, no mínimo, 90%. As remoções favoráveis para o uso exclusivo do cloreto férrico remetem ocorrido na pesquisa de Costa (1992), onde o uso de polímero natural (no caso, o amido de mandioca como auxiliar de floculação também em conjunto com o cloreto férrico em águas de manancial) não foi prioritário, dado o bom desempenho do coagulante químico por si só.

FIGURA 18 - Efeito do pH sobre a remoção de turbidez nas diferentes concentrações de cactácea e aplicação de dosagens de 10 e 5 mg/L de Fe_2O_3



Fonte: Autor

Considerando-se a concentração de cacto como uma variável, a análise de variância permitiu inferir, com uma confiabilidade de 95%, que para as concentrações maiores, isto é, $1,5 \times 10^3$, $2,0 \times 10^3$ e $2,5 \times 10^3$ mg/L de cactácea, a remoção de turbidez foi prejudicada. Isto ocorreu para ambos os pHs estudados, sendo mais evidente no pH 7, onde houve maior disparidade entre os valores de remoção para cada concentração aplicada.

O experimento controle, isto é, aquele sem adição de *Opuntia cochenillifera*, não permitiu deduções sobre o cruzamento dos fatores pH e concentração de cloreto férrico, na medida em que o intervalo de confiança considerado apresentou interseção entre os dados. Situação similar ocorreu com a menor concentração de cacto aplicada, $5,0 \times 10^2$ g/L, onde supõe-se que o efeito promovido pela coagulação por cloreto férrico tenha se sobreposto à ação da cactácea como auxiliar.

Para as demais concentrações de *Opuntia cochenillifera*, a FIGURA 18 indica que o pH 7 promoveu resultados mais baixos para remoção de turbidez, independente da concentração de coagulante químico aplicada. Esta indicação corrobora o verificado na ANOVA *one-way*, onde o pH 9 foi indicado como o mais adequado.

Diante dos resultados, ratifica-se que, de maneira geral, os diferentes parâmetros de qualidade para cada água exigem diferentes mecanismos de coagulação. O uso de polímeros naturais pode ser vantajoso ou não, dependendo da qualidade da água bruta, do tipo e das dosagens do polímero, bem como do coagulante primário em questão (COSTA, 1992).

Situações nas quais há diferenças na eficiência obtida pelo uso de polímeros naturais são relatadas na literatura, a exemplo do trabalho de Costa (1992), o qual, com base nos diagramas de coagulação, estudou os amidos de batata, mandioca e araruta como auxiliares de floculação em dosagens que variavam entre 0,2 e 5 mg/L, em conjunto com o sulfato de alumínio. Dois tipos de água foram investigados, sendo um deles com turbidez alta (em torno de 200 uT) e cor verdadeira baixa (5 uC) e outro com turbidez baixa (5 uT) e cor verdadeira alta (100 uC). Os resultados demonstraram que os auxiliares de floculação foram mais efetivos na região da varredura do que na região da adsorção-neutralização. De maneira geral, o amido de mandioca apresentou melhor resultado que os demais. Além disso, a utilização dos polímeros demonstrou ser mais vantajosa para água de cor alta e turbidez baixa.

A pesquisa de Costa *et al.* (2014), por sua vez, utilizou a água bruta proveniente do manancial Rio das Velhas, tal qual o presente trabalho, porém em um período de

poucas chuvas, no qual predomina baixa turbidez. No referido estudo, que considerou turbidez inicial de 9,64 NTU, a aplicação de sulfato ferroso clorado como coagulante primário em conjunto com a *Opuntia cochenillifera* foi eficiente, na medida em que a concentração de cactácea de 1000 mg/L registrou turbidez remanescente de 0,74 NTU (remoção de 92%). Utilizando-se apenas o sulfato ferroso clorado, houve uma remoção equivalente a 7%, o que demonstra que a utilização da cactácea é satisfatória no mecanismo de adsorção.

Sendo assim, nota-se que a investigação dos polímeros naturais como auxiliares de floculação apresenta-se ainda pertinente, na medida em que a determinação de sua eficiência na clarificação das águas varia em função dos parâmetros de qualidade da água bruta, métodos de processamento do vegetal e concentrações aplicadas, dentre outros fatores que direcionarão o mecanismo de coagulação predominante. Tratando-se de uma tecnologia verde (OLADOJA *et al*, 2015), o estudo dos polímeros naturais é, portanto, recomendado, de modo a verificar as suas possibilidades de aplicação.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho utilizou o extrato de *Opuntia cochenillifera* obtido a partir de secagem, pulverização, diluição em água destilada e posterior filtração. O produto foi caracterizado em termos de grupos funcionais a partir do seu espectro infravermelho, tendo sido identificadas bandas de absorção referentes a estruturas de carboidratos, presentes na mucilagem, bem como radicais amidas, que constituem sítios potenciais para adsorção.

Verificou-se por meio da análise de variância dos resultados coletados que concentrações diferentes de cacto alteraram significativamente a remoção de turbidez dentro de cada tratamento específico (combinação dos fatores: velocidade de sedimentação – pH da água bruta – dosagem de cloreto férrico) mas não foi possível inferir um valor ótimo, dado que todas as remoções foram inferiores ao uso de cloreto férrico por si só. E diminuída a dosagem de coagulante químico, por sua vez, a eficiência da remoção de turbidez foi comprometida, independente da concentração de cactácea aplicada. Melhores remoções foram verificadas em pH mais elevado.

Concluiu-se, portanto, que o uso de *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação do cloreto férrico não contribuiu com aumento de eficiência da coagulação em águas de alta turbidez para os pHs estudados. As características da água e dosagens de coagulante químico estudadas demandaram a coagulação com o mecanismo de varredura, onde predominam altas dosagens de coagulante, junto ao pH elevado, não sendo compatíveis com o que favorece a ação dos polímeros naturais, isto é, os mecanismos de adsorção e formação de pontes.

Dados os fatores intervenientes na coagulação, o presente trabalho não exclui a possibilidade de aplicação da *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação. Recomenda-se a realização de estudos diversos, de modo a compreender a amplitude do uso da cactácea em diferentes configurações operacionais, demais parâmetros de qualidade de água bruta e métodos de extração do polímero.

7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Dados os relatos de eficiência da *Opuntia cochenillifera* discutidos na literatura, sugere-se ampliar a investigação do seu potencial, aplicando outros métodos de processamento e comparando os resultados de testes preliminares. A partir da definição da melhor técnica, é possível dar prosseguimento à pesquisa.

De modo a compreender a amplitude de atuação do vegetal como auxiliar de floculação, cabe estudar águas com características diferentes, principalmente em termos de turbidez da água a ser estudada. Além disso, recomenda-se verificar outros parâmetros, tais como a cor e, além disso, realizar uma caracterização físico-química mais detalhada, visto que a composição de uma água bruta de manancial difere consideravelmente da água sintética predominantemente utilizada nos estudos em escala de bancada. Salienta-se que, obtendo-se resultados satisfatórios, pode-se estudar a morfologia dos flocos através de micrografia.

Além de abordar outros valores para turbidez inicial, é válido testar intervalos de pH variados, explicitando a eficiência da cactácea em diferentes circunstâncias. Um dos fatores sugeridos para a adequação da análise é trabalhar com maiores velocidades de sedimentação, isto é, menores tempos de coleta, visto que os flocos gerados pelo cloreto férrico apresentam rápida sedimentação.

A disposição de resultados de remoção de turbidez pode ser feita na forma de diagrama de coagulação. Este permite uma amplitude maior de compreensão da atuação dos mecanismos de envolvidos e constitui uma ferramenta no estudo da utilização dos polímeros como auxiliares de floculação, visando possibilitar escolhas mais adequadas em termos de investigação das dosagens do coagulante em função do pH de coagulação.

REFERÊNCIAS

ANASTASAKIS, Konstantinos; KALDERIS, Dimitrios; DIAMADOPOULOS, Evan. Flocculation behavior of mallow and okra mucilage in treating wastewater. **Desalination**, [s.l.], v. 249, n. 2, p.786-791, dez. 2009.

ANTOV, Mirjana G.; SĆIBAN, Marina B.; PETROVIĆ, Nada J. Proteins from common bean (*Phaseolus vulgaris*) seed as a natural coagulant for potential application in water turbidity removal. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 101, n. 7, p.2167-2172, abr. 2010.

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **JAWWA**, v. 74, n. 4, p. 2010-216, 1982.

BOF, Juliane Giacomini. **Remoção de turbidez e de fitoplâncton por meio da sedimentação e da flotação, com base no diagrama de coagulação do sulfato de alumínio: avaliação em escala de bancada**. 2007. 127 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

BOLTO, B; GREGORY, J. Organic polyelectrolytes in water treatment. **Water Research**, [s.l.], v. 41, n. 11, p.2301-2324, jun. 2007.

BONGIOVANI, Milene Carvalho *et al.* Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 32, n. 2, p.167-170, mar. 2010.

BORBA, L. **Viabilidade do Uso da *Moringa Oleífera* Lam no Tratamento Simplificado de Água para Pequenas Comunidades**. 2001. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2001.

CAPANEMA, Selma Parreira. **Instrumentação e controle de uma estação de tratamento de água**. 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CARDOSO, K. C. **Estudo do processo de coagulação-floculação por meio da moringa oleífera LAM para obtenção de água potável**, Dissertação (Mestrado). Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá – UEM, Maringá, 2007.

CARVALHO, Maria José Herkenhoff. **Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável**. 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

CERQUEIRA, Daniel Adolpho. **Remoção de oocistos de *Cryptosporidium parvum* e de indicadores no tratamento de água por ciclo completo, filtração direta descendente e dupla filtração, em escala piloto**. 2008. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

COSTA, E. R. H. da. **Estudo do uso de polímeros naturais como auxiliares de floculação com base no diagrama de coagulação do sulfato de alumínio**. 1992. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

COSTA, E. R. H. da. Melhoria da qualidade da água tratada e aumento da capacidade de ETAs através da escolha adequada de coagulantes e auxiliares, em águas com alcalinidade alta: Estudo de caso. In: XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2001, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

COSTA, E. R. H. da. *et al.* Utilização de polímeros naturais das espécies *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-dyck e *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench como auxiliares de floculação no tratamento de água. In: XXXIV CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 34., 2014, Cidade do México. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2014.

COSTA, E. R. H. da; SILVA, K. J. S. ; GUIMARÃES, A. R. M. Plant-based polymeric coagulants for water and wastewater treatment: a green technology approach. In: XXXV CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 35., 2016, Cartagena de Índias. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2016.

DAVIS, Mackenzie L.. **Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice**. New York: Mcgraw-hill, 2010.

DÍAZ, A. *et al.* A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. **Process Biochemistry**, [S.l.], v. 35, p.391-395, jun. 1999.

DI BERNARDO, A. S.; DI BERNARDO, L.; FROLLINI E.; MARTINELLI, P.S. Empregos de amido de milho catiônico, comum e híbrido como auxiliares de

coagulação/floculação. In: XXVII CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre - RS. **Anais Eletrônicos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

DI BERNARDO, L. (coord.) **Filtração Direta Aplicada a Pequenas Comunidades**. Rio de Janeiro. Editora ABES, 2003. 491 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ª ed. v. 1. São Carlos: RiMa. 2005.

FRANCO, Monalisa. **Uso de coagulante extraído de sementes de *Moringa oleifera* como auxiliar no tratamento de água por filtração em múltiplas etapas**. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

GARCÍA, Jasser Martínez; SILGADO, Luis Enrique González. **Evaluación del poder coagulante de la Tuna (*Opuntia ficus indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas**. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade de Cartagena, Cartagena de Indias, 2012.

HENRIQUES, Juscelino Alves. **Potencial de uso da *Moringa oleifera* Lamarck na clarificação de água para abastecimento em comunidades difusas da mesorregião agreste paraibana**. 2012. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos da qualidade e tratamento de água**. 3ª.ed. Campinas, SP. Átomo. 2010.

LIMA, Guilherme Júlio de Abreu. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MARTÍNEZ, Daimarys *et al.* Performance of cactus *Lefaria* to use like coagulating in the water clarification. **Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia**, Macaraibo, v. 26, n. 1, p.27-33, abr. 2003.

MENDES, C. G. N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. 244p. 2v. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MILLER, S. M.; FUGATE, E. J; CRAVER, V. O.; SMITH, J. A.; ZIMMERMAN, J. B. et al. Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of *Opuntia spp.* as a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. **Environmental Science Technology**, v. 42, n. 12, p.4274-4279, abr. 2008.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. **Applied statistics & probability for engineers**. 4. ed. S. L: Wiley, 2006.

NOUGBODÉ, Yéwêgnon Alima Esther Irma *et al.* Evaluation of the *Opuntia dillenii* as Natural Coagulant in Water Clarification: Case of Treatment of Highly Turbid Surface Water. **Jwarp**, [s.l.], v. 05, n. 12, p.1242-1246, 2013.

OLADOJA, Nurudeen Abiola. Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operations. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 6, p.174-192, jun. 2015.

ORTIZ, Ángel Villabona; ASTUDILLO, Isabel Cristina Paz; GARCÍA, Jasser Martínez. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. **Rev. Colomb. Biotecnol.**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.137-144, jul. 2013.

ÖZACAR, M.; ŞENGİL, L. Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s.l.], v. 229, n. 1-3, p.85-96, nov. 2003.

PÁDUA, V. L. Introdução ao Tratamento de Água. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (ed.) **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 859 p.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 205p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PAVANELLI, G. ; BERNARDO, L. . Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com turbidez elevada e cor verdadeira baixa. In: VI SIMPÓSIO ITALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL 2002, Vitória. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária 2002.

PRITCHARD, M. *et al.* Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. **Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/b/c**, [s.l.], v. 34, n. 13-16, p.799-805, jan. 2009.

RAMOS, R. O., **Clarificação de água com baixa turbidez e cor moderada usando sementes de *Moringa oleífera***. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2005.

RITCHER, C. A. **Água: métodos e tecnologias de tratamento**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2009. 333p.

RITCHER, C. A., AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água – tecnologia atualizada**, São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1991.

SANGHI, R., BHATTACHARYA, B., DIXIT, A., SINGH, V., 2006. *Ipomoea dasysperma* seed gum: an effective natural coagulant for the decolorization of textile dye solutions. **Journal of Environmental Management** 81 (1), 36–41.

SHAW, Duncan James. **Introdução à química dos coloides e de superfícies**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1975. 185 p.

SILVA, C. A. **Estudos aplicados ao uso da *Moringa oleífera* como coagulante natural para melhoria da qualidade de águas**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, Minas Gerais. 2005.

SILVERSTEIN, Robert *et al.* **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. 7 ed. LTC, 2006.506 p.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª edição. v.1, 2005. 452 p.

SPINELLI, Viviane Aparecida. **Quitosana, polieletrólito natural para o tratamento de água potável**. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SUBRAMONIAN, Wennie; WU, Ta Yeong; CHAI, Siang-piao. A comprehensive study on coagulant performance and floc characterization of natural *Cassia obtusifolia* seed gum in treatment of raw pulp and paper mill effluent. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], v. 61, p.317-324, nov. 2014

TAVARES, Renata Mendes. **Utilização da Moringa em água residuária de suínos**. 2012. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Animal, Universidade José do Rosário Vellano (UNIFENAS), Alfenas, 2012.

TEH, Chee Yang; WU, Ta Yeong; JUAN, Joon Ching. Optimization of agro-industrial wastewater treatment using unmodified rice starch as a natural coagulant. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], v. 56, p.17-26, mai. 2014.

THEODORO, Joseane Debora Peruço, *et al.* Coagulants and Natural Polymers: Perspectives for the Treatment of Water. **Plastic and Polymer Technology**, Terre Haute, v. 2, n. 3, p.55-62, set. 2013.

TORRES, Luis G.; CARPINTEYRO-URBAN, Sandra; CORZO-RIOS, Luis J.. Use of *Annona diversifolia* and *A. muricata* seeds as source of natural coagulant- flocculant aids for the treatment of wastewaters. **European Journal Of Biotechnology And Bioscience**, S.l., v. 2, n. 1, p.16-22, set. 2013.

TRATA BRASIL, Instituto (Org.). **Saneamento Básico - Planos Municipais ou Regionais - Exigência Legal**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2009. Disponível em: <www.tratabrasil.org.br>. Acesso em: 19 jul. 2015.

TREVISAN, Thales Schwanka. **Coagulante tanfloc sg como alternativa ao uso de coagulantes químicos no tratamento de água na ETA Cafezal**. 2014. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

UNDP. **Human Development Report**. United Nations Development Programme. 2015. 272 p.

YIN, Chun-yang. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, [s.l.], v. 45, n. 9, p.1437-1444, set. 2010.

ZAPPI, D.; TAYLOR, N.; SANTOS, M.R.; LAROCCA, J. *Cactaceae* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB1614>>. Acesso em: 27 Out. 2016

ZARA, Ricardo Fiori; THOMAZINI, Maria Helena; LENZ, Guilherme Felipe. Estudo da eficiência de polímero natural extraído do cacto mandacaru (*Cereus jamacaru*) como auxiliar nos processos de coagulação e floculação no tratamento de água. **REA – Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v. 14, n. 2, p.75-83, 2012.

ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO CLORETO FÉRRICO

FR LAB 001 - CERTIFICADO DE QUALIDADE			
<small>BAUMINAS</small>		Revisão: 02 _ Data: 14/05/2012 _ Responsável: Laboratório	
Certificado n°: 1527	Produto: Cloreto Férrico	Cód. Prod.: 015040004	
Cliente: Cia de Saneamento de Minas Gerais- COPASA		Cód. Cliente: 000032	
Nº Ped. De Compras: NA	Quantidade: 19.500 L		
Nota Fiscal n°: 028.605		Validade: 3 anos	
Data fabricação: 01/09/16	Lacre de terceiro n°: NA	Lacre n°: 128505/128509	
Parâmetros	Especificação	Unid.	Resultado
			Lote: 22L20109
Densidade	Mín.1,40 Máx. 1,45	g/cm3	1,4234
Teor de Fe ₂ O ₃	Mín. 18,8	%	19,00
Fe ²⁺ (como Fe ₂ O ₃):	2,00	%	0,15
FeCl ₃ :	Mín. 38	%	38,63
Teor de Acidez Livre como HCl	Máx. 1,0	%	0,36
Teor de Insolúveis	Máx. 0,5	%	0,08
Temperatura	Máx. 40	° C	34
.....
Data do Carregamento: 02/09/2016		Lote da embalagem: NA	
Legenda: NA = Não Aplicável			

Gabriela Moreira Princeza
Gabriela Moreira Princeza.

Responsável Técnico

C.R.Q. n° 02416812 - 2ª região

BAUMINAS QUÍMICA LTDA - FILIAL

Rod. MG 030 - Km 05- Bairro Nova Suíça - CEP 34000-000 - Nova Lima - MG - CNPJ: 19.525.278/0003-72

Tel.: (31) 3541.6277 - Fax: (31) 3541. 6277 - E-mail: laboratorio.novalima@bauminas.com.br



BAUMINAS



ANEXO B – BOLETIM INFORMATIVO DA CAL HIDRATADA

 <p>Boletim Informativo de Análises (RQ 30)</p>	<p>CAL OESTE LTDA</p> <p>Rod. MG 439 Km 4.5 CAIXA POSTAL 1 Cep. 35578-000 CORREGO FUNDO – MG CNPJ: 16.784.001/0001-04 I.Est.: 784.126015-0093 Tel. (37) 3323-5005 caloeste@caloeste.com.br</p>	<p>Nota Fiscal 25969</p>	<p>Data/Hora 02/09/2016 21:40</p>																																																																																				
	<p>Placa HMF-9278</p>																																																																																						
	<p>Peso Total(Tonelada) 28,74</p>																																																																																						
<p>Cliente COMPANHIA SAN. MINAS GERAIS-COPASA MG</p>																																																																																							
<p>Produto CAL HIDRATADA A GRANEL</p>																																																																																							
<p>B.A:013/14 METODOLOGIA: NBR 8473/10790/16448 DATA DE FABRICACAO: 31/08/2016 LOTE: 08/16 DATA DE VALIDADE: 12 MESES</p>																																																																																							
<table border="1"> <tr><td>P.F.</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>SiO2</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>CaO</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>MgO</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>S</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>P</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>Fe2O3</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>Al2O3</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>SO2</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>TOTAL</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>CaO Disponível</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>CO2</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>R.I.</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>R. Extincao</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>Umidade</td><td>%</td><td>0,39</td></tr> <tr><td>CaCO3</td><td>%</td><td>5,38</td></tr> <tr><td>Ca(OH)2</td><td>%</td><td>91,28</td></tr> <tr><td>Mg(OH)2</td><td>%</td><td>1,80</td></tr> <tr><td>Fluor</td><td>ppm</td><td></td></tr> <tr><td>RI+SiO2</td><td>%</td><td>1,12</td></tr> <tr><td>Dioxinas e Furanos (pg I-TEQ/Kg)</td><td>-</td><td></td></tr> <tr><td>Reatividade Whizer - 10'</td><td>ml</td><td></td></tr> <tr><td>Reatividade ASTM</td><td>C</td><td></td></tr> <tr><td>Retido na Peneira 0,044 mm</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>Retido na Peneira 0,053 mm</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>Retido na Peneira 0,074 mm</td><td>%</td><td></td></tr> <tr><td>Retido na Peneira 0,149 mm</td><td>%</td><td>2,01</td></tr> <tr><td>Retido na Peneira 0,59 mm</td><td>%</td><td></td></tr> </table>				P.F.	%		SiO2	%		CaO	%		MgO	%		S	%		P	%		Fe2O3	%		Al2O3	%		SO2	%		TOTAL	%		CaO Disponível	%		CO2	%		R.I.	%		R. Extincao	%		Umidade	%	0,39	CaCO3	%	5,38	Ca(OH)2	%	91,28	Mg(OH)2	%	1,80	Fluor	ppm		RI+SiO2	%	1,12	Dioxinas e Furanos (pg I-TEQ/Kg)	-		Reatividade Whizer - 10'	ml		Reatividade ASTM	C		Retido na Peneira 0,044 mm	%		Retido na Peneira 0,053 mm	%		Retido na Peneira 0,074 mm	%		Retido na Peneira 0,149 mm	%	2,01	Retido na Peneira 0,59 mm	%	
P.F.	%																																																																																						
SiO2	%																																																																																						
CaO	%																																																																																						
MgO	%																																																																																						
S	%																																																																																						
P	%																																																																																						
Fe2O3	%																																																																																						
Al2O3	%																																																																																						
SO2	%																																																																																						
TOTAL	%																																																																																						
CaO Disponível	%																																																																																						
CO2	%																																																																																						
R.I.	%																																																																																						
R. Extincao	%																																																																																						
Umidade	%	0,39																																																																																					
CaCO3	%	5,38																																																																																					
Ca(OH)2	%	91,28																																																																																					
Mg(OH)2	%	1,80																																																																																					
Fluor	ppm																																																																																						
RI+SiO2	%	1,12																																																																																					
Dioxinas e Furanos (pg I-TEQ/Kg)	-																																																																																						
Reatividade Whizer - 10'	ml																																																																																						
Reatividade ASTM	C																																																																																						
Retido na Peneira 0,044 mm	%																																																																																						
Retido na Peneira 0,053 mm	%																																																																																						
Retido na Peneira 0,074 mm	%																																																																																						
Retido na Peneira 0,149 mm	%	2,01																																																																																					
Retido na Peneira 0,59 mm	%																																																																																						
<p>Responsável técnico: GERALDO LECIO CANDIDO Reg.CRQ N.02403099 2. Regiao</p>																																																																																							
<p><i>Documento emitido eletronicamente, dispensando assinatura do responsável técnico.</i></p>																																																																																							