

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE QUÍMICA E BIOLOGIA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS AMBIENTAIS

THAYSE GUILHERME FERREIRA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CACTO DA ESPÉCIE *OPUNTIA FICUS-INDICA* COMO COAGULANTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Curitiba
2015

THAYSE GUILHERME FERREIRA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CACTO DA ESPÉCIE *OPUNTIA FICUS-INDICA* COMO COAGULANTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais do Departamento Acadêmico de Química e Biologia – DAQBi – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador(a): Profa. Dra. Lucila Adriani Coral

Curitiba
2015

THAYSE GUILHERME FERREIRA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CACTOS DA ESPÉCIE *OPUNTIA FICUS-INDICA* COMO COAGULANTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do grau de TECNÓLOGO EM PROCESSOS AMBIENTAIS pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBi) do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela seguinte banca examinadora:

Membro 1 – Profa. Dra. Fátima de Jesus Bassetti
Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

Membro 2 – Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR

Orientadora – Profa. Dra. Lucila Adriani Coral
Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

Coordenador de Curso – Prof. Dr. Alessandro Feitosa Machado

Curitiba, 16 de abril de 2015.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer à deusa Pachamama por nos fornecer tudo que precisamos para sobreviver nesse planeta lindo que chamamos de casa.

Agradeço também todo o apoio e palavras de incentivo vindos da minha família, especialmente minha mãe. Ao meu pai por sempre compartilhar seus conhecimentos comigo. E à minha irmã por ser um exemplo e inspiração.

Um “muito obrigada” que só encontra valor equivalente em um abraço para a minha fiel companheira de batalhas acadêmicas – e da vida: Rubia.

Minhas sinceras desculpas por quaisquer transtornos causados e meu eterno agradecimento pela paciência e injeções de ânimo e coragem, à melhor orientadora que eu poderia escolher – obrigada, Lucila.

Obrigada às professoras Fátima e Karina por fazerem a gentileza de participar da banca e me ajudar na correção desse trabalho que está longe de ser perfeito.

Por fim, serei eternamente grata à todxs amigxs que, de uma forma ou de outra, tornaram possível que eu chegasse até aqui sem sofrer nenhum dano psicológico irreparável: Karla, Renata, Maira, Fernanda, Thais, Octavio, Kelsey, Pâmella, Dani, e aquela pessoa desconhecida que sorriu pra mim em um dia ruim.

Que fique registrada minha gratidão à todas e todos.

We have a hunger of the mind which asks for knowledge of all around us, and the more we gain, the more is our desire; the more we see, the more we are capable of seeing. (Maria Mitchell)

A mente é faminta de todo o conhecimento a nossa volta, e quanto mais conhecimento adquirimos, mais desejamos; quanto mais vemos, mais somos capazes de ver. (Maria Mitchell)

RESUMO

FERREIRA, THAYSE G. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CACTOS DA ESPÉCIE *OPUNTIA FICUS-INDICA* COMO COAGULANTE NO TRATAMENTO DE ÁGUA. 2015. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnologia em Processos Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Tendo em vista a qualidade da água dos mananciais do Brasil, o tratamento de água é um processo indispensável para o fornecimento de água própria para o consumo humano. A coagulação, etapa essencial do tratamento, utiliza sais metálicos como coagulante. Com vistas a oferecer alternativas mais sustentáveis ao processo de tratamento de água, trabalhos investigam o potencial de coagulação de diferentes espécies vegetais. Este trabalho buscou avaliar o desempenho de extrato de cactos da espécie *Opuntia ficus-indica* como possível coagulante natural no tratamento de água, através de testes de coagulação e avaliação da eficiência de remoção de turbidez da água. Foram testados dois métodos de obtenção do coagulante, sendo mais eficaz o processo de pulverização do cacto através de secagem em estufa a 80°C por 24h seguido de trituração e peneiração. Os testes de coagulação realizados levaram em consideração a turbidez inicial que variou de 50 uT a 300 uT, pH da água utilizada (4, 6, 7, 8 e 10) e dosagem do coagulante que variou de 20 a 100 mg/L. Os melhores resultados foram encontrados para águas de turbidez inicial elevada e dosagens de coagulante em torno de 60 mg/L. Para a faixa de turbidez inicial de 200 uT, por exemplo, a remoção de turbidez chegou a 70,4% e 72,3% para as dosagens de coagulante de 60 e 80 mg/L, respectivamente. Entretanto, optou-se por trabalhar com a dosagem de 30 mg/L no decorrer do estudo, tendo em vista que a eficiência não diferiu significativamente daquela obtida com o dobro da dosagem de coagulante. Nesse caso, ao aplicar 30 mg/L de coagulante, a eficiência de remoção para turbidez inicial de 200 uT foi de 68,9%. A faixa de pH ideal para o processo de coagulação foi determinada como sendo entre 8 e 10. Também foi avaliada a possibilidade do cacto de atuar de forma auxiliar a coagulação com o composto metálico PAC demonstrando potencial quando comparado a estudos similares a exemplo dos 95,0% de eficiência de remoção ao aplicar-se ambos os coagulantes na proporção de 50,0% de cada. Os resultados obtidos mostraram que o cacto apresenta potencial para ser utilizado como coagulante natural e sugere-se a execução de trabalhos que busquem aperfeiçoar o método de extração de seus princípios ativos, de modo a aumentar sua eficiência.

Palavras-chave: Tratamento de água. Coagulante natural. *Opuntia ficus-indica*. Palma forrageira.

ABSTRACT

FERREIRA, THAYSE G. PERFORMANCE ASSESSMENT OF THE CACTUS FROM THE *OPUNTIA FICUS-INDICA* SPECIES AS A COAGULANT IN WATER TREATMENT. 2015. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnologia em Processos Ambientais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Considering the water quality of watersheds in Brazil, the water treatment is an essential process for providing water suitable for human consumption. Coagulation, an essential step of water treatment, uses metal salts as coagulant. In order to provide more sustainable alternatives to the water treatment process, studies investigate the coagulation potential for different plant species. This work aimed to evaluate the performance of cactus extract from the *Opuntia ficus-indica* species as a possible natural coagulant in water treatment through coagulation testing and evaluating the efficiency of removal of water turbidity. Two methods for obtaining the coagulant were tested and the most effective one was pulverizing the cacti by drying it at 80°C for 24h, followed by trituration and sieving. Coagulation tests carried out took into consideration the initial turbidity that varied from 50 NTU to 300 NTU, pH of water (4, 6, 7, 8 and 10) and dosage of coagulant used that varied from 20 to 100 mg/L. The best results were found for water with high initial turbidity and coagulant dosages of about 60 mg/L. For the initial turbidity in the range of 200 NTU, for example, the removal reached 70.4% and 72.3% for the coagulant dosages of 60 and 80 mg/L, respectively. In the following tests, however, the 30 mg/L dosage was adopted since efficiency did not differ significantly from that obtained with twice the coagulant dosage. In that case, by applying 30 mg/L of coagulant, the efficiency for the 200 NTU initial turbidity reached 68.9%. The optimum pH range for the coagulation process was determined to be between 8 and 10. The possibility of cactus performing as an auxiliary coagulant with PAC was also evaluated and proved to have potential when compared to similar studies as shown by the 95.0% efficiency of removal after the use of both coagulants in a proportion of 50.0% each. The results show that the cactus has potential to be used as a natural coagulant and the execution of studies that aim to perfect the extraction method of its active constituent are suggested as a means to increase its efficiency.

Palavras-chave: Water treatment. Natural coagulant. *Opuntia ficus-indica*. Prickly pear cactus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Exemplo de cactos <i>Opuntia ficus-indica</i>	22
Figura 2 Exemplo da configuração do modelo "caixa de ovos"	30
Figura 3 Estruturas viscosas formadas durante a coagulação (indicado pelas setas)	31
Figura 4 Mucilagem do cacto <i>Opuntia ficus-indica</i> antes do processo de secagem.	32
Figura 5 Turbidez residual e eficiência de remoção de turbidez com base na turbidez inicial e dosagem de coagulante utilizada	33
Figura 6 Turbidez residual e remoção de acordo com o pH (Turbidez inicial: 200 uT; dosagem de coagulante: 30 mg/L)	36
Figura 7 Turbidez residual e eficiência de remoção de acordo com diversas proporções de cacto e PAC para diferentes valores de turbidez inicial (o valor 26,1 corresponde a turbidez da água natural sem a adição de caulim)	38
Figura 8 Comparação de testes de coagulação utilizando <i>O. ficus-indica</i> e PAC (turbidez inicial: 200 uT)	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros utilizados e resultados obtidos em estudos anteriores com <i>Opuntia ficus-indica</i>	24
Tabela 2 Parâmetros utilizados no jar test e remoção de turbidez obtida em cada método de extração	29

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
cm	centímetro
DQO	Demanda Química de Oxigênio
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
g	grama
h	hora
km ²	quilômetro quadrado
L/hab.dia	litro por habitante por dia
M	molar
mg/L	miligrama por litro
min	minuto
mL	mililitros
<i>M. oleifera</i>	<i>Moringa oleifera</i>
<i>O. ficus-indica</i>	<i>Opuntia ficus-indica</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAC	Policloreto de Alumínio
rpm	rotações por minuto
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
µg/L	micrograma por litro
µm	micrometro
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
uT	unidade de turbidez

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.1 SANEAMENTO	14
3.1.1 Legislação	15
3.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA.....	16
3.2.1 Coagulação e Floculação	16
3.2.2 Sedimentação	17
3.2.3 Filtração.....	18
3.3 COAGULANTES	18
3.3.1 Policloreto de Alumínio (PAC)	19
3.3.2 Coagulantes Naturais	21
3.3.3 Cactos	22
4.1 ÁGUA DE ESTUDO	25
4.1.1 Caracterização das Amostras.....	25
4.2 PREPARO DO COAGULANTE NATURAL.....	25
4.3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	26
4.3.1 Pré-testes de Coagulação	26
4.3.2 Ensaio de Tratabilidade em Jar test.....	27
4.3.3 Avaliação das Melhores Condições: Turbidez Inicial, Dosagem e pH	27
4.3.4 Cacto como Auxiliar de Coagulação.....	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
5.1 MÉTODO DE EXTRAÇÃO DO COAGULANTE	29
5.2 AVALIAÇÃO DAS MELHORES CONDIÇÕES.....	32
5.2.1 Influência do pH	35
5.2 AVALIAÇÃO DA ASSOCIAÇÃO DE COAGULANTE DE CACTO E PAC	37

1. INTRODUÇÃO

Com 82,4% da população brasileira tendo acesso a água tratada e um consumo médio per capita de água de 162,6 L/hab.dia (SNSA, 2013), é indispensável que essa água seja de qualidade e que seu tratamento ofereça os menores riscos possíveis, tanto ao ambiente quanto à saúde humana.

Saneamento e saúde são assuntos que estão diretamente ligados. Não raramente, a implantação ou melhora de sistemas de abastecimento de água ocasiona impacto positivo na saúde de uma comunidade, prevenindo doenças e até mortes (PRÜSS-USTIN *et al.*, 2008). Entretanto, ainda que sua implantação diminua a incidência de doenças transmissíveis pela água, substâncias químicas utilizadas na sua operação podem ter efeitos adversos (CECH; MONTERA, 2000; BONDY, 2010), como é o caso dos coagulantes metálicos utilizados na etapa de coagulação para o tratamento de água. Dessa forma, a limitação do uso desses coagulantes está sendo cada vez mais considerada (SIMATE *et al.*, 2012).

Por esse motivo, o estudo da viabilidade de utilização de coagulantes naturais em substituição aos coagulantes metálicos torna-se cada vez mais recorrente. A *Moringa oleifera*, uma das plantas mais estudadas para a obtenção de coagulante (YIN, 2010), em comparação ao sulfato de alumínio, apresenta vantagens como a ausência de necessidade de correção de alcalinidade e pH e não apresenta corrosividade. Além disso, a produção de lodo tende a ser inferior e o lodo produzido não apresenta riscos ambientais (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995). Zara, Thomazini e Lenz (2012) fizeram observações semelhantes ao utilizarem extrato de cactos Mandacaru como auxiliar de coagulação/floculação. Em seu trabalho, estes autores destacaram a formação de flocos grandes e filamentosos resultando na formação de agregados maiores e mais densos quando comparado ao uso exclusivo do coagulante metálico, além de acelerarem a sedimentação dos flocos formados.

Yin (2010) chama atenção para a necessidade de estudar outras plantas que não apresentem toxicidade e possam ser produzidas em massa, focando em características como presença de compostos conhecidamente coagulantes, como o ácido galacturônico. Essas condições são satisfeitas pela Palma Forrageira (*Opuntia ficus-indica*), um cacto extensivamente cultivado no nordeste do Brasil e que já

apresenta resultados satisfatórios demonstrando seu potencial como coagulante ao remover até 98% da turbidez da água em diferentes estudos (ZHANG *et al.*, 2006; YIN, 2010; PICHLER; YOUNG; ALCANTAR, 2012).

A utilização de coagulantes naturais, entretanto, tem como uma desvantagem o aumento na concentração de carbono orgânico residual devido à presença de materiais não-coagulantes (BELTRÁN-HEREDIA *et al.*, 2012). Dessa forma, a associação destes extratos aos já tradicionais compostos metálicos torna-se uma opção interessante, uma vez que os coagulantes naturais passam a atuar como auxiliares de coagulação/floculação e permitem uma redução na utilização de sulfato de alumínio, por exemplo, em torno de 50-80% (SUTHERLAND; FOLKARD; GRANT, 1990; ZARA; THOMAZINI; LENS, 2012).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho do extrato obtido do cacto *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural aplicado ao tratamento de água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram considerados como objetivos específicos deste estudo:

- Avaliar a eficiência da coagulação em função da forma de obtenção do coagulante;
- Estimar o efeito da dosagem do coagulante, pH e turbidez inicial na eficiência de remoção de turbidez e;
- Avaliar os efeitos da utilização do extrato de cacto combinado ao policloreto de alumínio (PAC) em diferentes proporções.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SANEAMENTO

Água e saúde são tópicos que estão diretamente ligados. Estima-se que a implementação de medidas de saneamento como tratamento de água e esgoto possa prevenir aproximadamente 9,1% das doenças ou 6,3% das mortes no mundo (PRÜSS-USTIN *et al.*, 2008). Um estudo sobre os impactos de diferentes medidas de saneamento mostrou que intervenções no abastecimento de água reduziram em 25% a frequência de doenças diarreicas. Tais intervenções consistiam na implementação ou melhora de sistemas de abastecimento de água, ou melhora na distribuição como, por exemplo, instalação de bombas manuais (FEWTRELL *et al.*, 2005).

Aproximadamente 89% da população mundial tem acesso à água tratada (WHO-UNICEF, 2012), o que significa que há, ainda, 780 milhões de pessoas sem acesso a esse tipo de serviço. Para o ano de 2015, a estimativa é de que 605 milhões de pessoas ainda não possuam acesso à água potável, totalizando 8% da população mundial. No Brasil, ao se considerar as áreas urbanas e rurais do País, a quantidade de pessoas com acesso à água tratada cai para 82,4% da população (SNIS, 2011).

Ainda que o Brasil seja um dos países com maior riqueza em recursos hídricos, apresentando 12% de toda a água doce superficial do planeta (ANA, 2010), a distribuição geográfica desse recurso é bastante desigual, assim como a distribuição da população que utiliza esse recurso. De acordo com dados da Agência Nacional de Águas (ANA), 81% da disponibilidade de água no território brasileiro concentram-se em 45% de sua extensão, na região Hidrográfica Amazônica, ao passo que as regiões Hidrográficas do Atlântico e do Paraná, que abrigam 81% da população brasileira contém apenas 9% dos recursos hídricos superficiais.

Considerando-se os dados apresentados acima e levando em conta que dos 47% dos municípios brasileiros que apresentam rede coletora de esgoto, apenas 18% aplicam algum tipo de tratamento, é de se esperar que a qualidade da água disponível esteja em risco. No Estado de São Paulo, considerada uma das áreas mais povoadas e industrializadas do país, os resultados de monitoramento da água

apresentam resultados relativamente satisfatórios. No entanto, em diversas bacias no restante do país, essa informação é escassa ou inexistente, tornando difícil uma avaliação completa do panorama nacional (ANA, 2005; 2012).

3.1.1 Legislação

“Toda água destinada ao consumo humano, distribuída coletivamente por meio de sistema ou solução alternativa coletiva de abastecimento de água, deve ser objeto de controle e vigilância da qualidade da água” (BRASIL, 2011). Na Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) são estabelecidos os procedimentos relativos ao controle e vigilância da qualidade da água e seu padrão de potabilidade, incluindo padrões microbiológicos, de turbidez, substâncias químicas e radioatividade que devem ser atendidos para toda a água destinada ao consumo humano.

Para atender a essas exigências, é necessário que a água destinada ao abastecimento passe por um sistema de tratamento cuja complexidade vai depender, basicamente, das condições da água bruta e das tecnologias disponíveis. Após o tratamento, a água deve apresentar parâmetros cujos valores estejam determinados nos anexos da Portaria nº 2914. No tratamento convencional, após filtração, por exemplo, a turbidez final deve ser de 0,5 uT em 95% das amostras. Para o padrão microbiológico, a água para consumo humano não pode apresentar *E. coli* em 100 mL de amostra. Cianotoxinas como as microcistinas, por exemplo, devem apresentar valores máximos de 1,0 µg/L (BRASIL, 2001).

3.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA

As tecnologias tradicionais de tratamento de água podem ser divididas em três operações principais: clarificação, filtração e desinfecção. A clarificação compreende as etapas de coagulação, floculação e decantação e tem como objetivo principal a remoção e/ou redução dos sólidos suspensos e dissolvidos. Posteriormente, a filtração se encarrega da remoção dos demais sólidos e microrganismos que não foram removidos durante a decantação. Os microrganismos que possam ser remanescentes, como bactérias e vírus, são inativados na etapa final de desinfecção (LIBÂNIO, 2010).

3.2.1 Coagulação e Floculação

A coagulação, considerada como o processo central no chamado tratamento convencional de água, consiste na adição de um coagulante à água e sua agitação objetivando a desestabilização de coloides e posterior formação de aglomerados maiores que passam, enfim, por processos de remoção de sólidos (NEWCOMBE; DIXON, 2006).

Para que ocorra a floculação, os coloides devem ser desestabilizados, o que pode ocorrer através de quatro mecanismos: compressão de dupla camada, adsorção-desestabilização, varredura, e formação de pontes químicas. No primeiro, a alta concentração de íons de carga positiva aumenta a força iônica ao redor do coloide reduzindo a espessura da referida dupla camada, possibilitando assim, a posterior aproximação das partículas. No mecanismo de adsorção-desestabilização há a formação de espécies hidrolisadas de carga positiva que podem ser adsorvidas na superfície das partículas (LIBÂNIO, 2010). No mecanismo de varredura, a variação de pH e a concentração de coagulante pode ocasionar a formação de precipitados, o que é obtido devido a formação de flocos maiores que aqueles formados nos demais mecanismos. Por fim, o mecanismo de formação de pontes utiliza polímeros de cadeias extensas às quais os coloides são adsorvidos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A mistura do coagulante – geralmente sais de alumínio ou de ferro – é realizada na unidade de mistura rápida onde há o contato inicial com as partículas ocasionando sua desestabilização; em seguida, a velocidade de agitação é reduzida na etapa de floculação possibilitando o contato entre as impurezas da água, que formam os flocos que serão removidos na etapa de sedimentação (DI BERNARDO, 2005).

O tamanho médio dos flocos formados – de 2 a 4 μm – implica diretamente na remoção parcial de microrganismos patogênicos, tendo em vista que bactérias do gênero *Salmonella* e coliformes totais, por exemplo, têm em torno de 0,5 a 2,0 μm de tamanho e vírus de 0,025 a 0,1 μm . Cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* apresentam dimensões de 10 a 14 μm e 4 a 6 μm de diâmetro respectivamente. Assim, a formação dos flocos de maiores dimensões tem o papel fundamental de envolver esses microrganismos garantindo sua remoção (LIBÂNIO, 2010).

3.2.2 Sedimentação

A sedimentação é um processo físico natural decorrente da ação da gravidade e corresponde à etapa de decantação dos flocos formados nas etapas anteriores (coagulação/floculação) (MACÊDO, 2007).

Se deixada em repouso por alguns dias ou semanas, a água pode ter todos os seus sólidos suspensos sedimentados ou flotados. Entretanto, para os sistemas de tratamento de água, essa não é uma opção viável. O volume de água tratado diariamente é muito alto e o fluxo contínuo, sendo assim, o tempo necessário para essa sedimentação seria muito alto.

Assim, os tanques de sedimentação são projetados para que o fluxo de água passe em uma velocidade baixa o suficiente para garantir a sedimentação das partículas, mas não baixa o bastante para tornar o processo demasiadamente lento. Em geral, a água permanece no tanque de sedimentação por poucas horas. Esse período é chamado de tempo de detenção (NATHANSON, 2008).

3.2.3 Filtração

A filtração é um processo físico com o objetivo de remover as impurezas ainda presentes na água após a etapa de sedimentação, através de sua passagem por um meio poroso. Os filtros são geralmente constituídos por areia, mas podem conter ainda outros materiais granulares como antracito, areia granada e carvão ativado (RICHTER, 2009).

A filtração pode ser lenta ou rápida e sua escolha depende da qualidade da água bruta e da população atendida. Em geral, a filtração lenta é utilizada em sistemas de tratamento que atendem populações pequenas e apresentam uma água bruta de boa qualidade. Já na filtração rápida podem-se obter bons resultados mesmo com águas apresentando turbidez acima de 1000 uT. Dentre as vantagens da filtração rápida, destaca-se a necessidade de uma área menor para sua implantação, a facilidade do sistema de limpeza e eficácia mesmo em água bruta com alta turbidez (SPELLMAN, 2003).

3.3 COAGULANTES

A escolha do coagulante deve basear-se na qualidade da água bruta, tecnologia de tratamento e de todos os custos envolvidos, que incluem não somente o custo do coagulante, como também o custo de auxiliares de coagulação, alcalinizantes e corretores de pH (LIBÂNIO, 2010).

Pelo fato de os coloides possuírem carga superficial negativa, um coagulante ideal seria um cátion trivalente, solúvel em pH neutro para que possa precipitar juntamente com os coloides e, por fim, não apresentar toxicidade, garantindo a segurança da água produzida. Os dois coagulantes mais utilizados no tratamento de água são sais de Alumínio (Al^{3+}) e Ferro (Fe^{3+}), e ambos satisfazem as três condições citadas (DAVIS; CORNWELL, 1998).

O sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$) é o coagulante mais utilizado no Brasil devido, principalmente, à sua eficácia já bem estabelecida, seu baixo custo e à

facilidade de transporte do material, que pode ser feita na forma líquida ou sólida (LIBÂNIO, 2010).

Cada mg/L de sulfato de alumínio reduz a alcalinidade da água em 0,50 mg/L produzindo 0,44 mg/L de dióxido de carbono, podendo aumentar o poder de corrosão da água. Caso a alcalinidade da água não seja suficiente para reagir, pode-se corrigir a alcalinidade através da adição de alcalinizantes, como a soda cáustica. A dosagem de sulfato de alumínio utilizada varia de 5 a 50 mg/L para valores de pH de 5,5 a 8,0, considerando a obtenção de melhores resultados de coagulação (VIESSMAN; HAMMER, 2004).

No entanto, qualquer que seja a dosagem utilizada, ao final do tratamento, a concentração de alumínio na água deve ser de, no máximo, 0,2 mg/L (BRASIL, 2011), de forma a prevenir a exposição da população a níveis do metal que possam não ser seguras. Em princípio, acreditava-se que a absorção de alumínio pelo organismo era limitada e que, portanto, sua presença no ambiente não oferecia riscos ao ser humano (BONDY, 2010). Recentes estudos, entretanto, apontam os efeitos do alumínio no organismo, principalmente ao sistema nervoso central (BONDY, 2014).

Ainda que os riscos apresentados pela presença de alumínio na água não sejam completamente conhecidos, considera-se apropriado que os devidos tratamentos sejam aplicados para a limitação de elevada concentração desse metal à água tratada (CECH; MONTERA, 2000; SIMATE *et al.*, 2012). Em um estudo realizado no entorno de uma estação de tratamento, e utilizando-se água de abastecimento de propriedades da área de estudo como amostra, Cech *et al.* (2000) encontraram concentrações de alumínio superiores àquela recomendada em 44% das amostras coletadas. Os autores apontam ainda que a presença de alumínio residual no sistema de distribuição pode prejudicar sua eficácia ao se depositar nas paredes das tubulações.

3.3.1 Policloreto de Alumínio (PAC)

Recentemente, coagulantes a base de alumínio pré-hidrolisado, como o policloreto de alumínio (PAC), têm sido desenvolvidos e pesquisados. O PAC (do

inglês *Polyaluminum Chloride*) foi criado a partir da neutralização parcial do cloreto de alumínio ($AlCl_3$) em diferentes teores de basicidade e seu uso tem aumentado continuamente. Pré-hidrolisar o $AlCl_3$ pode aumentar a quantidade de Al_{13} no processo de coagulação, sendo essa a espécie de Al mais eficiente na remoção de contaminantes devido ao seu maior tamanho e maior carga positiva (MATILAINEM; VEPSÄLÄINEN; SILLANPÄÄ, 2010).

Por conta de seu estado pré-polimerizado, o PAC, também conhecido como hidroxicloreto de alumínio, apresenta eficácia superior em comparação aos demais sais de alumínio atualmente utilizados. Essa eficácia, em torno de 1,5 a 2,5 vezes maior, também se deve às características de sua estrutura molecular condensada com pontes de oxigênio entre os átomos de alumínio, além da maior concentração de elemento ativo (Al_2O_3) (PAVANELLI¹, 2001 *apud* MACÊDO, 2007).

Os coagulantes poliméricos pré-hidrolisados apresentam algumas vantagens sobre os coagulantes convencionais incluindo uma menor dependência da temperatura ou pH, assim como um menor consumo de alcalinidade. Como desvantagem, pode-se apontar o fato de a eficácia do coagulante ser significativamente afetada pela especiação decorrente da hidrólise do coagulante. As espécies de Al pré-formadas são estáveis e não podem ser ainda mais hidrolisadas durante a coagulação. Além disso, seu uso pode não ser tão eficiente na remoção de matéria orgânica com características hidrofóbicas ou de alta massa molecular (MATILAINEM; VEPSÄLÄINEN; SILLANPÄÄ, 2010) e, embora a quantidade de lodo gerado com a utilização do PAC seja menor, ele ainda contém alumínio em sua composição e um residual de alumínio pode ser encontrado na água após o tratamento.

¹ PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** 2001. 216 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de Paulo, São Carlos, 2001.

3.3.2 Coagulantes Naturais

Nas últimas décadas, a incorporação de polímeros orgânicos ao processo de tratamento de água, na forma de auxiliares de coagulação, tem aumentado consideravelmente devido aos benefícios dessa medida que incluem a redução da dosagem do coagulante, além de aumentar a densidade dos flocos formados e reduzir o volume de lodo gerado (LIBÂNIO, 2010).

Esses polímeros podem ser naturais ou artificiais e suas cadeias devem ser suficientemente longas, de modo que a carga negativa dos coloides seja superada permitindo a adsorção das partículas em sua superfície, muitas vezes pelo mecanismo de formação de pontes químicas (LIBÂNIO, 2010). A predominância desse mecanismo, juntamente com o mecanismo de adsorção e neutralização de carga, se dá pelo fato de que quanto mais longa uma cadeia, maior será o número de sítios de adsorção livres (YIN, 2010).

Uma análise crítica compreendendo alguns dos coagulantes de origem vegetal foi feita por Yin (2010) mencionando 4 espécies vegetais mais estudadas e com maior potencial: sementes de *Moringa oleifera*, Cactos, e sementes de Nirmali e Taninos, sendo que estes últimos não serão abordados neste trabalho.

A Moringa, sendo a espécie mais estudada (YIN, 2010), é conhecida por possuir diversas aplicações desde alimentação a uso medicinal, principalmente em comunidades menos desenvolvidas. Diversos estudos apontam o bom desempenho da *M. oleifera* e suas vantagens sobre o sulfato de alumínio, dentre os quais, o fato de não necessitar de ajustes de pH ou alcalinidade, além de apresentar uma menor geração de lodo (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995; TORRES; CARPINTEYRO-URBAN; VACA, 2012). Pritchard *et al.* (2010a) atingiram até 90% de remoção de turbidez em condições ótimas de dosagem e verificaram que a coagulação com *M. oleifera* apresenta melhores resultados quando a turbidez inicial é relativamente alta.

Além de ser considerada uma “tecnologia verde”, a utilização de plantas como coagulante ganha ainda mais suporte quando considerados os pontos de vista sociais e econômicos relacionados. Ao se tratar de coagulantes naturais, um fato importante é que, além de ter origem em materiais de fonte renovável, esses materiais podem ser encontrados e cultivados em regiões onde sua aplicação se faz

necessária. Dessa forma, apesar de a *Moringa* ser a mais estudada e apresentar resultados satisfatórios, é de extrema importância que se pesquise a utilização de outras variedades de plantas, como os cactos, que crescem em regiões onde a *Moringa* não é encontrada (ZIMMERMAN *et al.*, 2008).

3.3.3 Cactos

Assim como a *M. oleifera*, os cactos do gênero *Opuntia* apresentam propriedades medicinais e são utilizados como fonte de alimentação tanto humana, quanto animal (YIN, 2010).

Conhecida no Brasil como Figueira da Índia ou Palma Forrageira, a espécie de cacto mais pesquisada para a obtenção de coagulantes é a *Opuntia ficus-indica* (Figura 1) (YIN, 2010). Largamente utilizada na alimentação de rebanhos, a palma é intensamente cultivada no Brasil, e em meados de 2006 chegou a apresentar a maior área cultivada da planta no mundo com mais de 500 mil hectares (SANTOS *et al.*, 2006). Um estudo feito por Moura *et al.* (2011) indica, ainda, que as mudanças climáticas previstas para atingirem o Brasil no futuro, pode resultar em um aumento na área apta a produção de palma forrageira nos próximos cem anos de 697.071 km² para até 1.092.632 km².



Figura 1 — Exemplar de cactos *Opuntia ficus-indica*

Fonte: autoria própria.

Como é possível observar na Figura 1, os cactos apresentam frutos e são formados por estruturas chamadas de cladódios, também conhecidas como raquetes, que são as partes da planta utilizadas para a obtenção dos extratos coagulantes.

Nos estudos de Zimmeman et al. (2008), os autores verificaram que a mucilagem contida no cacto é responsável por apenas 50% de sua eficácia como coagulante por conta da presença do composto ácido galacturônico. A mucilagem não é, portanto, o único componente envolvido na coagulação, tendo em vista que, ao utilizar raquetes inteiras do cacto *Opuntia*, a eficiência na remoção de turbidez é maior, como indicado pelos autores.

Ainda por conta das propriedades de sua mucilagem, o cacto do gênero *Opuntia* também foi pesquisado para avaliar seu potencial como biosorvente natural com vistas a remoção de corantes sintéticos de águas residuárias, tendo-se obtido resultados positivos e que mostram a eficiência da biomassa de cactos para o tratamento dessas águas de forma natural e econômica (BARKA et al., 2013).

Ortiz, Astudillo e Martínez (2013), em um estudo de caracterização do cacto *Opuntia*, sugerem que o baixo conteúdo de proteínas e a alta quantidade de carboidratos presentes na planta confirmam as suspeitas de estudos anteriores de que outras substâncias, além do ácido galacturônico, sejam responsáveis pela capacidade de coagulação do cacto, como os compostos algínicos, polissacarídeos de origem vegetal que apresentam propriedades gelificantes, de estabilização de emulsões e retenção de água (MIRANDA-MEDINA et al., 2008). Esse mesmo estudo avaliou a eficiência de redução de turbidez de águas naturais com turbidez inicial de 171 uT, obtendo como resultado 72% de remoção ao aplicar uma dose de 90 mg/L de coagulante.

Outro estudo, utilizando uma dose de 50 mg/L e turbidez inicial semelhante ao estudo anterior, 176 uT, apresentou remoção de 94% da turbidez da água artificial preparada. Um resultado semelhante foi obtido ao reduzir a dose para 30 mg/L em pH 10 (ZHANG et al., 2006). Com uma dose mais baixa que os estudos anteriormente citados – 13 mg/L – em um estudo realizado com água de estuário de turbidez inicial de 499 uT e água de rio de turbidez inicial de 547 uT, foram obtidas reduções de turbidez de 93,1 a 98,2% e 49,9 a 69,7%, respectivamente (YIN et al., 2006). A partir dos resultados apresentados nesses trabalhos, é possível perceber a influência da origem da água no desempenho do coagulante em termos tanto de

dosagem como de eficiência de remoção.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos resultados encontrados em alguns trabalhos e os respectivos parâmetros adotados.

Tabela 1 — Parâmetros utilizados e resultados obtidos em estudos anteriores com *Opuntia ficus-indica*

Tipo de água	Turbidez inicial (uT)	Dosagem ótima (mg/L)	Remoção de turbidez (%)	Referência
Sintética (caulim)	56-104	50	94,0	Zhang (2006)
Sintética (caulim + eletrólitos)	0-125	5-15	92,0-99,0	Zimmerman <i>et al.</i> (2008)
	125-250	15-35		
	250-375	35-55		
Natural (rio)	171	90	72,0	Ortiz <i>et al.</i> (2013)
Natural (rio)	547	13	49,9-69,7	Yang (2007)
Natural (estuário)	499			

Fonte: autoria própria

Em um estudo comparativo com sulfato de alumínio, Pichler, Young e Alcantar (2012) obtiveram resultados considerados excelentes com o cacto *Opuntia* ao demonstrar que a mesma eficiência de remoção de turbidez pôde ser obtida com o cacto utilizando uma dosagem 300 vezes menor que a do coagulante químico.

Pode-se dizer que, de modo geral, o desempenho de cactos do gênero *Opuntia* como coagulante varia de um estudo para outro dependendo de diversos fatores que vão desde a fonte da água utilizada até a dosagem do coagulante. Além disso, por se tratar de estudos realizados em diferentes locais, é possível que haja algumas diferenças na composição química das plantas, as quais variam de acordo com a espécie, idade do artigo, época do ano (WANDERLEY *et al.*, 2002), espaçamento das plantas e adubação (SANTOS; FERREIRA; BATISTA, 2005).

4. METODOLOGIA

4.1 ÁGUA DE ESTUDO

Para a realização deste trabalho, coletou-se água em um reservatório no Município de Curitiba/PR. Coletas foram feitas em diversas ocasiões, sempre no mesmo local, de acordo com a necessidade para realização dos ensaios. O procedimento de coleta e preservação das amostras foi realizado de modo a preservar ao máximo as características da água bruta, garantindo sua uniformidade ao longo do estudo.

Os ensaios de tratabilidade foram realizados com água preparada a partir da água coletada adicionada de caulim em diferentes concentrações de modo a produzir amostras com diferentes valores de turbidez, variando de 51 a 315 uT.

4.1.1 Caracterização das Amostras

A água coletada foi caracterizada quanto ao valor de pH e turbidez inicial no dia da coleta, anteriormente à refrigeração, utilizando-se um medidor de pH modelo PG 1800 GEHAKA, e um turbidímetro turbicheck lovibond GEHAKA.

4.2 PREPARO DO COAGULANTE NATURAL

Exemplares de cacto do gênero *Opuntia* foram coletados em uma propriedade localizada na Rua Alexandra Sarnacka, no Município de Curitiba.

Visando atender um dos objetivos específicos indicados inicialmente, dois procedimentos foram realizados para obtenção da solução coagulante a partir da planta, sendo um extrato sólido (pulverizado) e um extrato do polímero do cacto a partir de extração química.

Para obtenção do extrato sólido, utilizou-se uma metodologia adaptada

daquela proposta por Zimmerman *et al.* (2008). Com base nesta metodologia, as raquetes do cacto, também conhecidos como cladódios, foram enxaguadas com água corrente e, posteriormente, com água deionizada para limpeza apropriada. Em seguida, os espinhos foram retirados e as raquetes cortadas em tiras de 1 cm de largura. As tiras foram secas em estufa a aproximadamente 80 °C por 24h. A planta seca foi então triturada em liquidificador doméstico e peneirada com o auxílio de jogo de peneiras e peneirador eletromagnético (ABNT, 2010), de forma a proporcionar a obtenção de um pó com partículas de aproximadamente 300 µm de diâmetro. O pó obtido foi armazenado em recipientes selados e mantidos em geladeira por no máximo 15 dias. No momento do uso, o pó do cacto foi aplicado diretamente à água de estudo.

Para a extração do polímero em forma líquida, seguiu-se metodologia adaptada de Zara, Thomazini e Lenz (2012). O processo de extração foi precedido pela limpeza e corte das raquetes, como indicado na seção anterior e, em seguida, os fragmentos foram macerados com auxílio de graal e pistilo. A extração foi feita com uma solução de cloreto de cálcio 1%. A proporção utilizada foi de 1 g de cacto preparado para 2,5 mL da solução de extração. A mistura foi homogeneizada em agitador magnético durante 40 minutos e seguida de filtração à vácuo. O filtrado resultante foi mantido em frasco de vidro sob refrigeração e protegido da luz até a realização dos ensaios de coagulação.

4.3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.3.1 Pré-testes de Coagulação

Foram realizados pré-testes de coagulação com objetivo de determinar qual dos dois coagulantes obtidos a partir dos diferentes métodos de obtenção – extração salina e pulverização – apresentaria maior eficiência. Para tal, foram preparadas amostras com turbidez inicial de aproximadamente 100 uT, avaliando-se dosagens de 30 e 60 mg/L. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

4.3.2 Ensaio de Tratabilidade em Jar test

Para os testes de coagulação/floculação/sedimentação, foi utilizado equipamento *jar test*, tendo-se adotado os seguintes parâmetros operacionais: gradiente de mistura rápida de 350 s^{-1} (220 rpm) por 2 min; gradiente de mistura lenta de 15 s^{-1} (25 rpm) por 30 min; e tempo de sedimentação de 30 min (GARCIA; SILGADO, 2012). Ao final do tratamento, fez-se o controle da eficiência do tratamento a partir das medidas de turbidez final das amostras.

4.3.3 Avaliação das Melhores Condições: Turbidez Inicial, Dosagem e pH

Nessa etapa, a turbidez final das amostras foi utilizada como parâmetro para avaliar a influência de características físico-químicas na remoção de turbidez da água. Essa avaliação foi feita medindo-se a variação da turbidez inicial e final das amostras de acordo com diferentes condições iniciais dos parâmetros turbidez inicial, dosagem de coagulante e pH.

Inicialmente, foram realizados testes de coagulação com o objetivo de avaliar o desempenho do coagulante em diferentes valores de turbidez inicial (aproximadamente 50, 100, 200 e 300 uT) e diferentes dosagens de coagulante (20, 40, 60, 80 e 100 mg/L). Os valores de turbidez inicial desejados foram obtidos através da adição de caulim, um mineral de granulometria fina, constituída de material argiloso, normalmente com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca (Grim, 1958).

Em seguida, avaliou-se o desempenho do coagulante em diferentes valores de pH, através da correção do pH da água de estudo com HCl 1M ou NaOH 1M, de modo que os valores de pH testados foram iguais a 4, 6, 7, 8 e 10.

Para esse teste, utilizou-se turbidez inicial de aproximadamente 200 uT e dosagem de coagulante de 30 mg/L.

4.3.4 Cacto como Auxiliar de Coagulação

Além de avaliar o desempenho do cacto como um coagulante natural, avaliou-se a possibilidade de utilizá-lo como um auxiliar de coagulação junto ao PAC.

Para esse teste foram adotados três valores diferentes de turbidez inicial (26, 50 e 209 uT), sendo o mais baixo referente à turbidez inicial da água bruta, sem adição de caulim. A dosagem de coagulante utilizada foi de 30 mg/L em proporções percentuais de Cactos:PAC de 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 e 0:100.

Todos os ensaios descritos foram realizados em triplicata.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MÉTODO DE EXTRAÇÃO DO COAGULANTE

Em um estudo de 1999, Okuda *et al.* sugerem que a melhoria na eficiência do processo de coagulação ao utilizar-se NaCl como agente de extração deve-se, aparentemente, ao mecanismo de *salting in*, onde um sal aumenta a solubilidade de uma proteína através do aumento de dissociações proteína-proteína à medida em que a força iônica da solução de extração aumenta. Em estudo posterior, Okuda *et al.* (2001) testaram diferentes sais para extração do composto ativo da *Moringa* obtendo melhores resultados com cátions bivalentes, em especial com Ca²⁺. Por esse motivo decidiu-se utilizar o CaCl₂ para extração do cacto. Extrações com NaCl foram realizadas inicialmente, porém não houve resultados que pudessem ser discutidos, optando-se pela mudança do sal utilizado.

Os pré-testes realizados para determinação do melhor método de obtenção do coagulante mostraram que os coagulantes obtidos através de extração aquosa e salina não foram tão eficientes (máximo 29,5%) quando comparados ao coagulante obtido na forma de pó (máximo 59,0%) (Tabela 2).

Tabela 2 — Valores de remoção e turbidez residual para cada método de obtenção do coagulante e dosagem utilizada.

Método de extração	Dosagem (mg/L)	Turbidez inicial (uT)	Turbidez final (uT)	Remoção (%)
Extração aquosa	30	95,9	72,3	24,6
	60	103,0	73,8	28,3
Sol. extração CaCl ₂ (1%)	30	97,5	68,7	29,5
	60	93,5	69,4	25,8
Pó	30	91,8	49,7	45,9
	60	97,7	40,1	59,0

Fonte: autoria própria.

Conforme apresentado na Tabela 2, por exemplo, a aplicação de 30 mg/L de pó de cacto acarretou na remoção de 45,8% de turbidez, 35% maior que o melhor valor obtido entre as extrações aquosa e salina. Por esse motivo, nos demais testes

realizados, optou-se por utilizar o coagulante em pó que, além de proporcionar melhores resultados, apresenta um método de preparo simplificado quando comparado à extração salina.

Conforme mencionado anteriormente, a solubilidade de uma proteína em uma solução aumenta com a adição de um sal, podendo decair caso a concentração de sal seja demasiadamente elevada (ARAKAWA², 1985 *apud* ZHANG, 2012). Entretanto, conforme mencionado em trabalho de Ortiz, Astudillo e Marínez (2013), o cacto *Opuntia* apresenta baixo conteúdo de proteínas, mas a presença de compostos algínicos.

Em meio aquoso, esses compostos formam uma solução viscosa que é influenciada pela presença de sais divalentes, em especial o cálcio, que funcionam como pontes de ligação com os compostos algínicos (HAUG, 1961). Essa complexação entre compostos algínicos e cátions divalentes é explicada pelo modelo da “caixa de ovos” (GRANT *et al.*, 1973; GOYCOOLEA; CÁRDENAS, 2003; CÁRDENAS *et al.*, 2008), como pode ser observado na Figura 2.

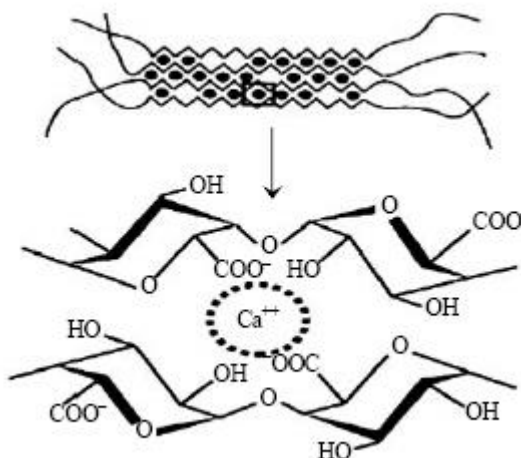


Figura 2 — Exemplo da configuração do modelo "caixa de ovos"

Fonte: Chaudhari e Chaudhari, 2014.

É possível que essa estrutura de caixa de ovos esteja envolvida no processo de coagulação envolvendo *O. ficus-indica*, agindo de forma complementar ao ácido galacturônico. De qualquer forma, a utilização de um sal de cálcio mostrou-se mais

² ARAKAWA, T., TIMASHEFF, S. N. Theory of protein solubility. **Meth. Enzymol.**, v. 114, p.49-77, 1985.

eficiente nesse caso quando comparado ao NaCl.

Além disso, Ca^{2+} afeta a capacidade de retenção de água e outras propriedades biofísicas da mucilagem do cacto (TRACHTENBERG; MAYER, 1982). Essa afirmação é corroborada por Sepulveda *et al.* (2007) que afirmam que a presença de elementos como o Ca^{2+} e K^+ é necessária para as propriedades gelatinosas da mucilagem, além de outros fatores como pH, temperatura, grau de esterificação, quantidade de açúcares e pectinas (CÁRDENAS *et al.*, 2008).

A presença desses compostos, bem como a influência do pH, podem ser utilizados como indicativos acerca da formação de estruturas filamentosas de aparência viscosa durante a coagulação, como pode ser observado na Figura 3.

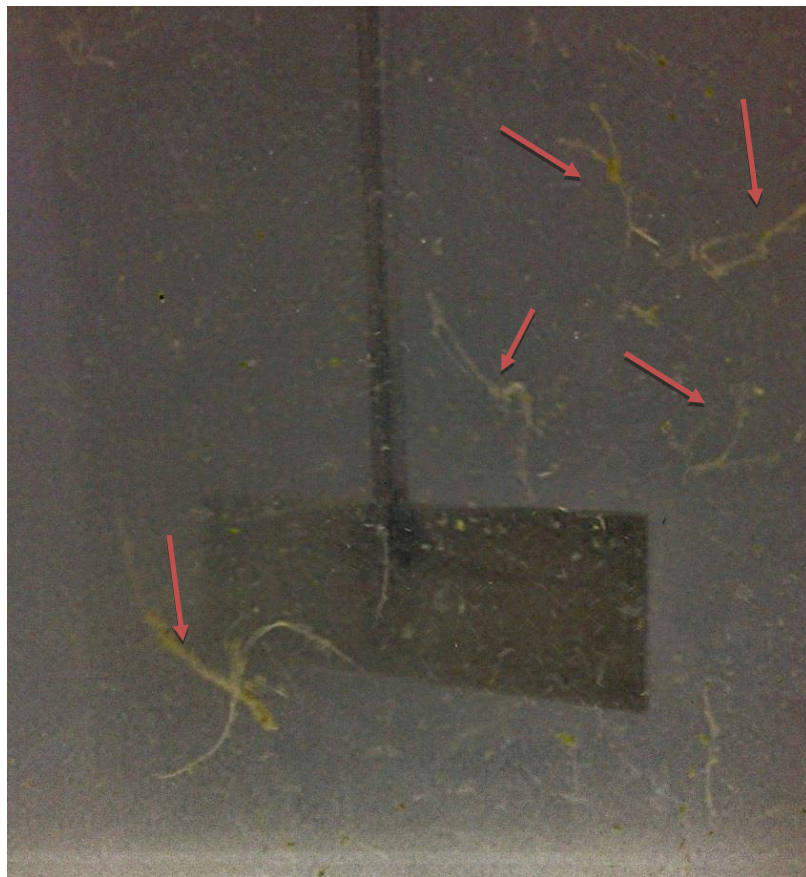


Figura 3 — Estruturas viscosas formadas durante a coagulação (indicado pelas setas)

Fonte: autoria própria.

Acredita-se que essas estruturas sejam a mucilagem original do cacto, como a apresentada na Figura 4, restituída a partir do pó por conta da reidratação de suas células. Nesse sentido, sugere-se que a determinação da viscosidade da planta possa ser um parâmetro interessante para o melhor entendimento do processo.



Figura 4 — Mucilagem do cacto *Opuntia ficus-indica* antes do processo de secagem.

Fonte: Autoria própria.

5.2 AVALIAÇÃO DAS MELHORES CONDIÇÕES

A primeira fase dos testes de coagulação foi a verificação da influência de dois fatores: a turbidez inicial e a dosagem do coagulante. Os resultados para esses testes são apresentados de forma condensada no gráfico apresentado na Figura 5. Os valores de turbidez inicial foram apenas aproximados aos valores almejados (50, 100, 200, 300 uT) devido à dificuldade de dosar o caulim de forma a alcançá-los.

No gráfico (Figura 5) é possível observar que, para os testes com menores valores de turbidez inicial, a turbidez residual apresenta uma leve tendência a aumentar conforme a dosagem de coagulante aumenta. Esse comportamento pode ser relacionado à matéria orgânica insolúvel presente no coagulante.

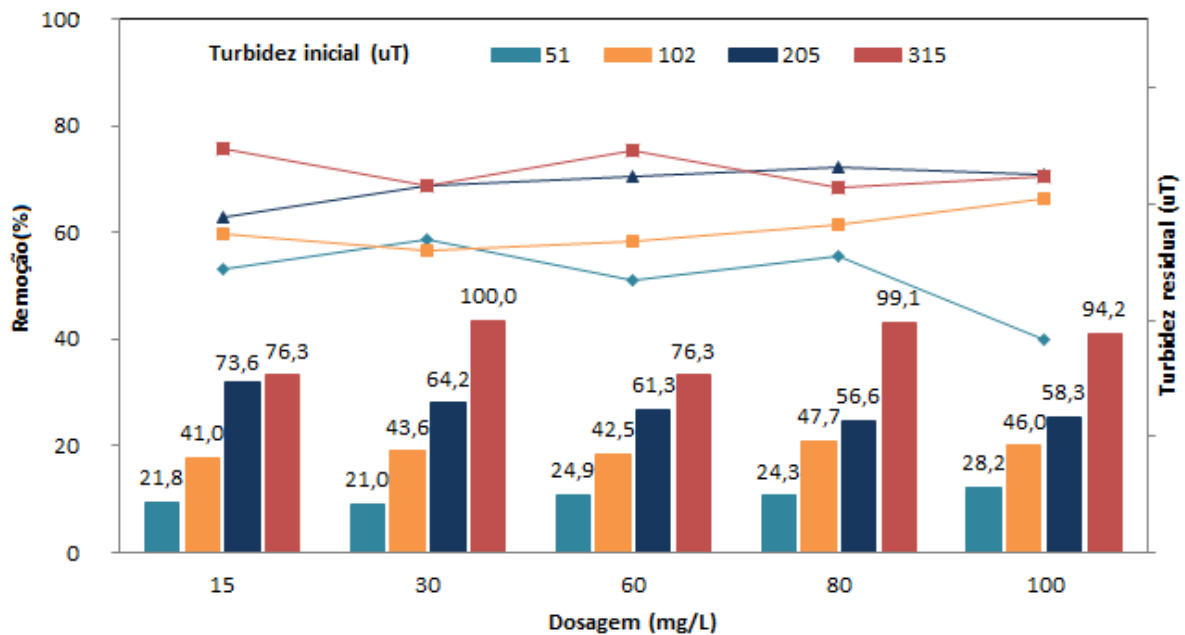


Figura 5 — Turbidez residual e eficiência de remoção de turbidez com base na turbidez inicial e dosagem de coagulante utilizada (os valores indicativos acima das colunas referem-se aos valores de turbidez residual)

Fonte: autoria própria.

Ainda que o uso de coagulantes naturais seja considerado uma opção sustentável no tratamento de água, o uso de extratos não purificados tem sido associado ao aumento de matéria orgânica na água tratada, quantificável em termos de carbono orgânico total e carbono orgânico dissolvido (CHOY *et al.*, 2014). Esse aumento pode ser explicado pela presença de diversas biomoléculas, como lipídios, que não participam do processo de coagulação (GHEBREMICHAEL, 2007).

Embora não tenha sido possível realizar testes de quantificação de matéria orgânica, esse efeito pode ser observado ao se verificar o resultado do teste da turbidez inicial mais baixa (51 uT) com a dosagem de coagulante mais alta (100 mg/L), no qual obteve-se a menor eficiência de remoção (40,0%) e a maior turbidez residual (28,2 uT) para este valor de turbidez inicial.

Pichler *et al.* (2012), estudando a utilização de mucilagem de cacto como floculante, indicaram que ao aumentar as doses de mucilagem, a turbidez do sobrenadante, após sedimentação dos flocos, também aumentou. Ainda segundo os autores, nesses casos, é possível melhorar a qualidade da água tratada utilizando-se filtros grosseiros para a etapa de filtração, tendo em vista que os flocos formados pela mucilagem do cacto são maiores e mais facilmente retidos, não necessitando

de sistemas de filtração mais avançados.

É possível afirmar também que, de modo geral, menores eficiências de remoção foram obtidas a partir menor valor de turbidez inicial, sendo o mais alto valor obtido igual a 58,6%. Pritchard *et al.* (2010a) obtiveram resultados similares utilizando sementes de *Moringa oleifera*, onde para a turbidez inicial mais baixa (40 uT) foi obtida uma eficiência de apenas 50,0% na remoção, quando comparada aos 90,0% de remoção observados para a turbidez inicial de 200 uT. Similarmente, Muyibi e Evison (1995) relataram que a eficiência de remoção de turbidez para tratamento com sementes de *Moringa* é maior em águas de alta turbidez, bem como Nishi *et al.* (2011) em um estudo de remoção de cianobactérias através de coagulação/floculação, em que melhores resultados foram obtidos para as amostras com turbidez inicial de 350 e 450 uT.

Pelo fato de serem considerados polieletrólitos, tanto a *Moringa* como o cacto, o resultado obtido no presente trabalho já era esperado devido ao fato de águas de baixa turbidez possuírem uma quantidade limitada de matéria coloidal (WEBER, 1972). Sendo assim, sugere-se que a justificativa para esse fato seja que a menor concentração de coloides em suspensão na água limite a taxa de contato entre partículas, limitando assim, o processo de coagulação de forma geral. Baghvand *et al.* (2010) comenta, inclusive, que, pelo fato de águas de baixa turbidez serem difíceis de coagular, por vezes adiciona-se turbidez sinteticamente para propiciar a formação de flocos mais pesados e passíveis de sedimentação.

Também é possível observar na Figura 5 que a eficiência de remoção obtida para a faixa de turbidez inicial de 315 uT oscila de acordo com a variação de dosagem do coagulante. Inicialmente, não é possível sugerir uma causa para essa oscilação, porém é possível observar um comportamento similar em um estudo de Pritchard *et al.* (2010b) utilizando a *Moringa*, onde as dosagens de 30 e 100 mg/L de coagulante resultaram em uma redução de turbidez de aproximadamente 85,0%, enquanto as dosagens de 50 e 125 mg/L propiciaram uma redução em torno de 72,0% e, ainda, uma redução média de 65,0% para as dosagens de 75 e 150 mg/L. Esta oscilação também pode ser observada em outros estudos envolvendo *O. ficus-indica* (ORTIZ; ASTUDILLO; MARTÍNEZ, 2013; FEDALA *et al.*, 2015), e *Cactus latifaria* (DIAZ *et al.*, 1999).

Para os valores intermediários de turbidez inicial (102 e 205 uT) foram valores mais lineares ao longo das variações de dosagem de coagulante. Por esse

motivo, e por apresentar uma taxa de remoção maior que as obtidas com a turbidez inicial em 102 uT, escolheu-se trabalhar com o valor de aproximadamente 200 uT para determinar o valor de pH ótimo do estudo.

Os melhores resultados observados para turbidez inicial de 205 uT foi de 70,4% e 72,3% de remoção de turbidez para as dosagens de coagulante de 60 e 80 mg/L, respectivamente. Este resultado pode ser comparado àqueles obtidos por Ortiz, Astudillo e Martínez (2013), que obtiveram aproximadamente 63,0% de remoção de turbidez utilizando 50 mg/L de coagulante e 72,0% ao aplicarem dosagem de 90 mg/L, para água com turbidez inicial de 171 uT. Similarmente, García *et al.* (2012), em seu trabalho utilizando o cacto *O. ficus-indica*, obtiveram remoções de turbidez iguais a 63,0 e 67,7% utilizando dosagens de 50 e 75 mg/L, respectivamente, com turbidez inicial de aproximadamente 175 uT. Também com turbidez inicial de 175 uT, porém utilizando *Moringa* como agente coagulante, Pritchard *et al.* (2010b) obtiveram aproximadamente 68,0% de remoção de turbidez ao utilizarem uma dosagem de 75 mg/L.

5.2.1 Influência do pH

De acordo com Sáenz, Sepúlveda e Matsuhiro (2004), a mucilagem é um polieletrólito carregado negativamente e que apresenta elevada viscosidade por conta das cargas negativas que causam alta repulsão intramolecular, resultando na expansão de suas moléculas. Dessa forma, além da concentração de Ca^{2+} , citada na seção 5.1, o pH influencia diretamente na viscosidade da mucilagem.

Na Figura 6 são apresentados os resultados dos testes de coagulação realizados em águas com diferentes valores de pH. A partir desses resultados sugere-se que a atividade de coagulação do cacto *O. ficus-indica* é maior em águas alcalinas, especialmente para valores de pH entre 8 e 10. Shilpa, Akanksha e Girish (2012), em acórdância com essa tendência, alcançaram maior redução de turbidez, com 80,0% de eficiência, quando em pH 9. Torres, Carpinteyro-Urban e Vaca (2012) estudaram a eficiência de remoção de DQO em águas residuárias utilizando a mucilagem do cacto *Opuntia* e obtiveram maior redução de DQO (65,0%) em pH 10. Essas constatações estão de acordo também com os resultados encontrados por

Zhang *et al.* (2006) e Zimmerman *et al.* (2008).

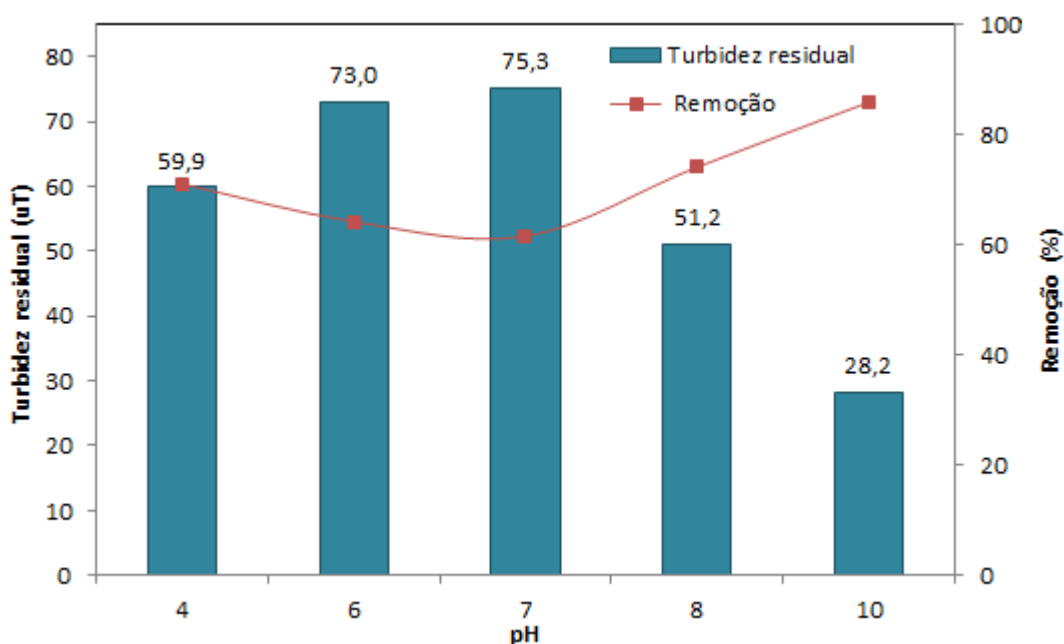


Figura 6 — Turbidez residual e remoção de acordo com o pH (Turbidez inicial: 200 uT; dosagem de coagulante: 30 mg/L)

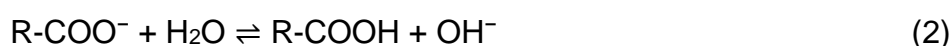
Fonte: autoria própria.

Trachtenberg e Mayer (1980) relatam que a viscosidade da mucilagem do cacto *Opuntia spp.* aumenta com o aumento do pH, o que é corroborado por Sáenz *et al.* (1992) que, pensando no uso do cacto como um aditivo alimentar, realizou um estudo preliminar sobre a influência do pH no comportamento reológico da mucilagem, confirmando a relação direta do aumento da viscosidade proporcionalmente ao pH do meio.

Coagulantes naturais são mais eficientes em águas alcalinas, como pode ser observado nos valores de pH de 8 e 10 (Figura 6). No caso da *M. oleifera*, o pH ótimo é levemente alcalino (MANDLOJ; CHAUDHARI; FOLKARD, 2004), já que em pH maior que 7 caulim e partículas argilosas possuem cargas predominantemente negativas (NDABIGENGESERE; NARASIAH; TALBOT, 1995). Isso possibilita a adsorção entre o caulim e as partículas catiônicas dos polieletrólitos da *Moringa*, evidenciando o mecanismo de neutralização de cargas. Em pH menor que 7, as partículas de caulim são menos carregadas negativamente, causando maior efeito de repulsão entre os polieletrólitos e as partículas (YIN, 2010).

Yin (2010) indica que, para o cacto *O. ficus-indica*, o efeito do pH da solução

no processo de coagulação é mais complicado e difícil de explicar devido à natureza desconhecida dos agentes envolvidos na coagulação, ainda que tenha sido sugerido que o ácido galacturônico desempenhe papel fundamental na coagulação de partículas de caulim. Essencialmente, o ácido galacturônico é considerado um polieletrólito aniônico, dessa forma sugere-se que as seguintes reações aconteçam em soluções aquosas:



Nesse caso, R- representa a estrutura central do ácido galacturônico. Para a reação (1), o grupo carboxila do ácido galacturônico dissocia parcialmente propiciando o grupo COO^- a agir como um sítio de adsorção para cátions (do caulim e do extrato de cacto, embora a quantidade de cátions do caulim seja menor em pH maior que 7). Na forma polimérica de ácido galacturônico, a quantidade de sítios de adsorção COO^- disponíveis é afetada pela concentração de OH^- na solução, como sugerido na equação (2). Em pH maior que 7, a concentração de OH^- aumenta e interrompe a concentração de equilíbrio dos íons na solução que, posteriormente, desloca o equilíbrio para a esquerda e permite que mais prótons do grupo carboxila formem moléculas de água expondo mais sítios de adsorção COO^- (YIN, 2010).

De modo geral, pode-se dizer que essas são apenas algumas sugestões acerca da influência do pH no processo de coagulação e que, apesar de não elucidarem completamente os mecanismos envolvidos neste processo, fornecem um entendimento preliminar sobre as condições ótimas necessárias para o aumento da eficiência de coagulantes naturais.

5.2 AVALIAÇÃO DA ASSOCIAÇÃO DE COAGULANTE DE CACTO E PAC

O PAC é um coagulante metálico caracterizado por diversas vantagens, das quais destacam-se a possibilidade de se trabalhar em uma ampla faixa de pH e em baixas temperaturas, além de apresentar alta eficiência em baixas concentrações quando comparado a outros coagulantes metálicos convencionais (AWAD; LI;

HONGTAO, 2013). Ao combinar o pó de cacto ao PAC, objetivou-se avaliar sua atuação como possível auxiliar de coagulação. Aliado à alta eficiência do PAC esperava-se que a utilização do cacto possibilitasse menor dosagem do coagulante metálico reduzindo ainda mais a concentração de metal presente no tratamento de água para consumo. Os resultados dos testes utilizando 30 mg/L de coagulante em diferentes proporções de cacto e PAC são exibidos na Figura 7.

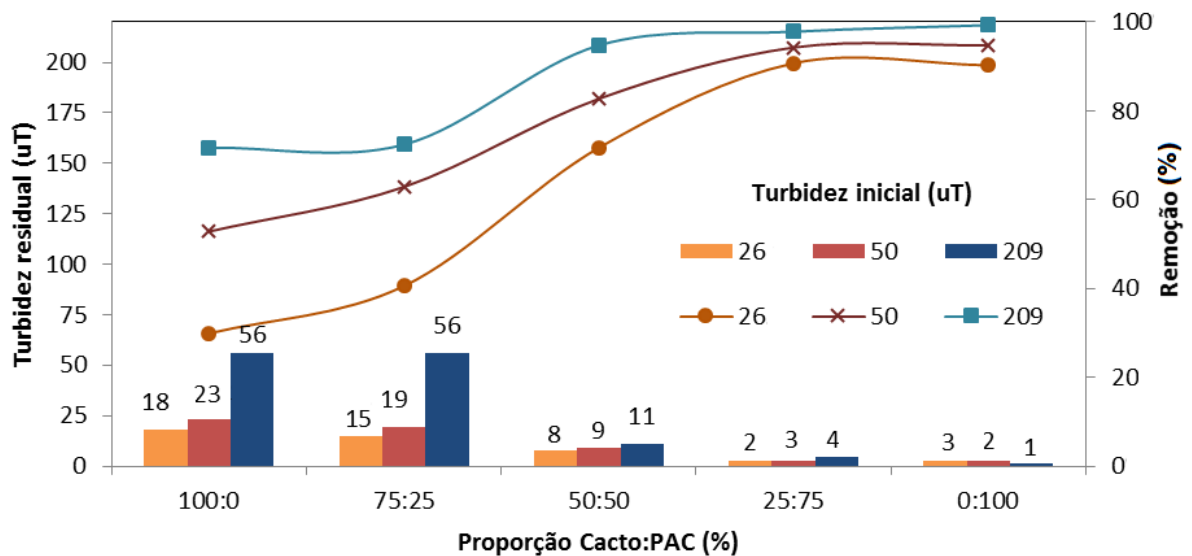


Figura 7 — Turbidez residual e eficiência de remoção de acordo com diversas proporções de cacto e PAC para diferentes valores de turbidez inicial (o valor 26,1 corresponde a turbidez da água natural sem a adição de caulim)

Fonte: autoria própria.

É possível observar que com 100,0% e 75,0% de *O. ficus-indica*, os valores de turbidez residual se mantiveram praticamente inalterados para cada faixa de turbidez inicial testada, apresentando eficiência de remoção máxima de 72% para a turbidez inicial de 209 uT. O mesmo valor foi encontrado por MIRANDA-MEDINA *et al.* (2008) utilizando amostras com turbidez inicial de 171 uT e aplicando uma dose de 90 mg/L de coagulante proveniente apenas do cacto.

Já com proporção 50:50 houve melhora significativa no resultado com eficiência de 95,0% de remoção para a faixa de turbidez inicial de 209 uT. Um valor similar (94,0%) foi encontrado por Zhang *et al.* (2006) utilizando 50 mg/L de pó de cacto e turbidez inicial de 176 uT. Ainda que no estudo de Zhang *et al.* não se tenha utilizado o PAC, é válido observar a performance da combinação de cacto:PAC por se tratar de uma dosagem 40,0% menor.

Em um estudo utilizando cactos Mandacaru (*Cereus jamacaru*) e sulfato de alumínio, Lenz *et al.* (2011) utilizaram dosagem de 13,3 mg/L de coagulante em duas condições, sendo uma em proporção 50:50 de cada coagulante e outra com o coagulante metálico de forma individual. Para uma amostra de água com turbidez inicial de 30 uT, o melhor resultado obtido através do coagulante metálico foi de 4 uT de turbidez residual. Quando utilizado em conjunto com o coagulante extraído do cacto, o melhor resultado foi de 2,7 uT, apresentando, portanto, eficiência de aproximadamente 91,0%, similar ao resultado obtido no presente estudo com o cacto *Opuntia*. Lenz *et al.* (2011), entretanto, aplicaram o extrato de cacto somente após a etapa de mistura rápida, utilizando-o, dessa forma, como um auxiliar de floculação.

Em um estudo posterior, Zara, Thomazini e Lenz (2012) utilizaram dosagem de 20 mg/L de sulfato de alumínio adicionados de 1 mL de extrato de cacto Mandacaru para tratar amostras de turbidez inicial de 20,3 uT. Neste estudo, os melhores resultados obtidos variaram de 88,2 a 93,5% de eficiência de remoção, dependendo da solução (NaOH, NaCl, HCl) utilizada no método de extração. Estes valores se mostram melhores, porém não tão distantes, do encontrado no presente trabalho onde, para o valor mais baixos de turbidez (26,1 uT), a eficiência de remoção chegou a 72% para a proporção 50:50, considerada mais próxima das condições do trabalho publicado por Zara, Thomazini e Lenz (2012). É válido observar que esses resultados seguem a tendência dos resultados apresentados na seção 5.2, onde testes realizados em águas com valores de turbidez inicial mais baixos apresentam menor eficiência de remoção. Esse comportamento foi observado em outros estudos com coagulantes naturais como sementes de *Moringa oleifera* (MUTHURAMAN; SASIKALA, 2014) e *Jatropha curcas* (ABIDIN *et al.*, 2013).

Para turbidez inicial de 50,3 uT, por exemplo, obteve-se eficiência de 94% para a proporção 25:75, utilizando dosagem de 22,5 mg/L de PAC. Ao aplicar 30 mg/L de PAC em uma amostra de turbidez inicial de 47 uT, Awad, Li e Hongtao (2013) obtiveram 96% de remoção. Ao comparar os resultados, pode-se inferir que é possível alcançar eficiências de remoção de turbidez similares utilizando-se quantidades menores de PAC quando associadas ao coagulante extraído do cacto.

Ainda para os valores mais baixos de turbidez, não é observada diferença significativa nos valores de turbidez residual ao utilizar-se as proporções de 25:75 e 0:100 de cacto:PAC. Esse comportamento muda ao se tratar da água com turbidez

mais elevada (209 uT) que, com 100% de PAC, atingiu 99,3% de eficiência na remoção de turbidez, 4,5% a mais do que resultado obtido com metade da dosagem (50:50).

Com a finalidade de comparar o desempenho do PAC como coagulante único e seu uso junto ao coagulante de cacto, foram realizados testes complementares. Os resultados desses testes podem ser observados na Figura 8.

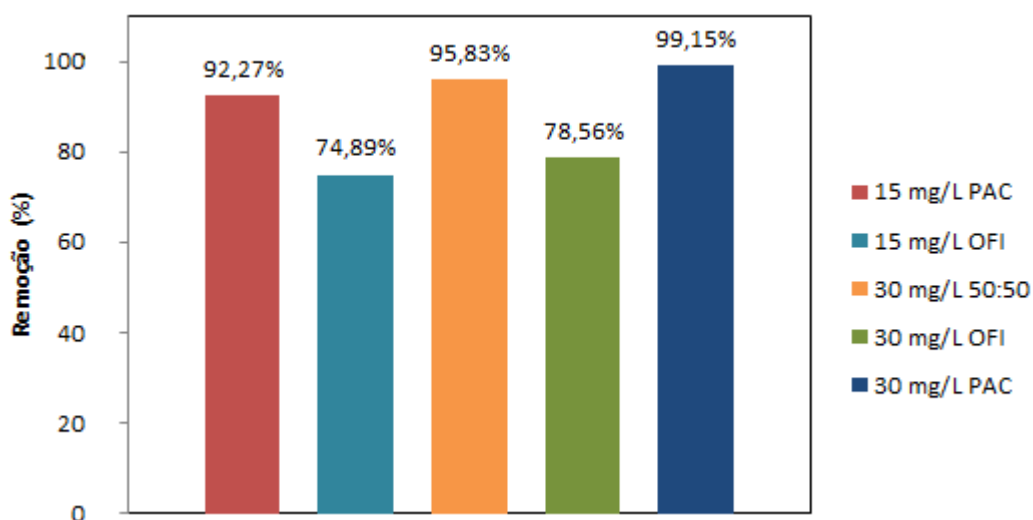


Figura 8 — Testes comparativos entre o uso isolado e em conjunto dos coagulantes PAC e *O. ficus-indica* e PAC (turbidez inicial: 200 uT)

Fonte: autoria própria.

Como observado na Figura 8, o uso do PAC isoladamente para dosagem de 15 mg/L, na turbidez avaliada, mostrou-se mais eficiente se comparado ao uso do cacto nas mesmas condições e que o aumento de dosagem de 15 para 30 mg/L não aumentam de forma expressiva os valores de remoção. Quando avaliados em conjunto (30 mg/L 50:50), se comparado a mesma dosagem de PAC isoladamente, o resultado obtido foi levemente inferior. Embora que visualmente o uso do cacto como auxiliar possa parecer pouco interessante do ponto de vista de remoção, deve-se considerar que a redução da concentração do coagulante metálico para um residual de turbidez similar, é uma vantagem que deve a ser consideração. Em um estudo comparativo utilizando coagulante de cacto e cloreto de alumínio ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$), Zhang *et al.* (2006) obtiveram melhores resultados com o cacto, aplicando dosagens de 20 a 100 mg/L e obtendo valores de turbidez residual abaixo de 10 uT. No mesmo estudo, os autores avaliaram a eficiência na remoção de turbidez do coagulante de

cacto e $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ individualmente, bem como sua aplicação em conjunto. Os melhores resultados foram obtidos após a aplicação dos dois coagulantes em conjunto, apresentando eficiência de aproximadamente 90,0% para doses entre 60 e 120 mg/L. Os melhores resultados encontrados para o uso isolado de cacto e coagulante metálico foram obtidos ao utilizar-se dosagens de 60 e 50 mg/L apresentando eficiência de aproximadamente 85,0 e 90,0%, para o cacto e $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, respectivamente.

Comparando-se os resultados obtidos no presente estudo aos resultados obtidos por Zhang *et al.* (2006), é possível sugerir que, de forma isolada, o desempenho do coagulante de cacto não diferiu tanto do esperado tendo em vista que ao utilizarem a dosagem de 30 mg/L, Zhang *et al.* obtiveram 83,0% de remoção de turbidez, apenas 4,4% a mais do obtido no presente estudo e indicado na Figura 8. Além disso, a dosagem de 30 mg/L dos coagulantes combinados no trabalho de Zhang *et al.* resultou na eficiência de, aproximadamente, 88,0% de remoção, 7,8% menor do que a encontrada no presente trabalho.

No caso de Zhang *et al.* (2006), é possível traçar uma comparação mais próxima ao presente trabalho pelo fato de o método de obtenção do coagulante de cacto ter sido o mesmo (pulverização - transformação do caco na forma de pó), enquanto nos trabalhos desenvolvidos por Lenz *et al.* (2011) e Zara, Thomazini e Lenz (2012) foi utilizada uma metodologia de extração diferente (extração em solução). Ainda assim, colocados em paralelo, os estudos possibilitam a discussão acerca do uso do coagulante obtido a partir do cacto *O. ficus-indica* e sua possível utilização como um auxiliar de coagulação.

Em um estudo de comparação entre *Moringa oleifera* e coagulantes metálicos, Pritchard *et al.* (2010b) chegaram às mesmas conclusões quando sulfato de alumínio e de ferro apresentaram resultados melhores que a *Moringa* sozinha, apontando inclusive a redução de turbidez e densidade de bactéria após passagem por filtro de areia.

Independentemente da eficiência de cada um dos coagulantes usados de forma isolada, é importante lembrar que ao usá-los em conjunto objetiva-se a redução da concentração de alumínio residual tanto na água como no lodo gerado, bem como melhoria na qualidade deste lodo em termos de volume e facilidade de desidratação. Além disso, ainda que os resultados alcançados pelo cacto não sejam tão eficientes quanto os resultados dos coagulantes metálicos, vale ressaltar que as

etapas de coagulação, floculação e sedimentação são seguidas pela etapa de filtração que irá, ainda, eliminar a turbidez remanescente na água em questão.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que o cacto da espécie *Opuntia ficus-indica* apresenta potencial para ser utilizado como coagulante natural no tratamento de água, conforme evidenciado em trabalhos anteriores de mesma natureza.

Neste estudo, a melhor forma de obtenção do coagulante, tanto em relação à sua eficiência quanto à simplicidade de preparo, foi a partir da pulverização do cacto e aplicação do pó diretamente na água de estudo.

Em conformidade com estudos anteriores, o pH ótimo para condução dos ensaios de coagulação, situa-se no intervalo de 8 a 10. A dosagem ideal de aplicação do coagulante de cacto foi estabelecida em torno de 30 mg/L, levando-se em conta a pouca diferença dos resultados obtidos com dosagens superiores.

Como esperado para coagulantes de origem natural, as melhores eficiências foram obtidas para águas de turbidez inicial mais elevada, em torno de 200 uT.

Embora não apresente incrementos expressivos como coagulante auxiliar, o cacto *Opuntia ficus-indica* demonstra potencial quando comparado a estudos similares a exemplo dos 95,0% de eficiência de remoção ao aplicar-se 50,0% de cacto e PAC. Sendo assim, é possível sugerir a execução de novos trabalhos que busquem aperfeiçoar o método de extração de seus princípios ativos, de modo a aumentar sua eficiência.

7 RECOMENDAÇÕES

De modo a aumentar a eficiência do uso de coagulantes naturais, em específico do cacto da espécie *Opuntia ficus-indica*, sugere-se a execução de trabalhos que busquem avaliar diferentes parâmetros de obtenção do coagulante como, por exemplo: Concentração do sal; Sal utilizado; Métodos de secagem; Granulometria; Purificação do extrato, entre outros.

Além disso, sugere-se a otimização dos parâmetros utilizados através da diminuição da dosagem de coagulantes, associação a outros coagulantes metálicos e avaliação da influência de fatores como: temperatura, alcalinidade e matéria orgânica.

REFERÊNCIAS

- ABIDIN, Z. Z.; SHAMSUDIN, N. S. M.; MADEHI, N.; SOBRI, S. Optimisation of a method to extract the active coagulant agent from *Jatropha curcas* seeds for use in turbidity removal, **Industrial Crops and Products**, v. 41, p. 319-323, 2013.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil**: 2005. Brasília: ANA, 2005.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil: abastecimento de água: panorama nacional**. Brasília: ANA, 2010.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil**: 2012. Brasília: ANA, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1:2010 : Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT). Rio de Janeiro, 2010.
- AWAD, M.; LI, F.; HONGTAO, W. Application of natural clays and Poly Aluminium Chloride (PAC) for wastewater treatment. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, v. 15, n. 2, p. 287-291, 2013.
- BAGHVAND, A.; ZAND, A. D.; MEHRDADI, N.; KARBASSI, A. Optimizing coagulation process for low to high turbidity waters using aluminum and iron salts. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 6, n. 5, p. 442-448, 2010.
- BARKA, N.; OUZAOUILT, K.; ABDENNOURI, M.; EL MAKHFOUK, M. Dried prickly pear cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes as a low-cost and eco-friendly biosorbent for dyes removal from aqueous solutions. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 44, n. 1, p 52-60, 2013.
- BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; MUNOZ-SERRANO, A.; PERES, J. A. Towards overcoming TOC increase in wastewater treated with *Moringa oleifera* seed extract. **Chemical Engineering Journal**, v. 188, p. 40-46, 2012.
- BONDY, S. C. The neurotoxicity of environmental aluminum is still an issue. **NeuroToxicology**, v. 31, n. 5, p. 575-581, September, 2010.
- BONDY, S. C. Prolonged exposure to low levels of aluminum leads to changes associated with brain aging and neurodegeneration. **Toxicology**, v. 315, p. 1-7, January, 2014.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011.
- CÁRDENAS, A.; GOYCOOLEA, F. M.; RINAUDO, M. On the gelling behaviour of 'nopal' (*Opuntia ficus indica*) low methoxyl pectin. **Carbohydrate Polymers**, v. 73, n. 2, p. 212-222, 2008.

CECH, I.; MONTERA, J. Spatial variations in total aluminum concentrations in drinking water supplies studied by geographic information system (GIS) methods. **Water Research**, v. 34, n. 10, p. 2703-2712, 2000.

CHAUDHARI, P. M.; CHAUDHARI, P. D. Formulation and characterization of extruded and spheronized pellets using pectin and crosslinking agents. **Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences**, v. 23, n. 11, p. 790-798, 2014.

CHOY, S. Y.; NAGENDRA, K. M. P.; WU, T. Y.; RAGHUNANDAN, M. E.; RAMANAN, R. N. Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. **Journal of Environmental Sciences**, v. 26, n. 11, p. 2178-2189, 2014.

DAVIS, M. L.; CORNWELL, D. A. **Introduction to Environmental Engineering**. Boston: McGraw-Hill, 1998.

DIAZ, A.; RINCON, A. N.; ESCORIHUELA, N.; FERNANDEZ, E.; CHACIN, C.; FORSTER, F.; A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. **Process Biochemistry**, v. 35, n. 3-4, p. 391-395, 1999.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Segunda edição, São Carlos, SP: Editora Rima, 2005.

FEDALA, N.; LOUNICI, H.; DROUCHE, N.; MAMERI, N.; DROUCHE, M. Physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Opuntia ficus-indica* cactus. **Ecological Engineering**, v. 77, p. 33-36, 2015.

GARCÍA, J. M.; SILGADO, L. E. G. **Evaluación del poder coagulante del a tuna (*Opuntia ficus indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas**. Trabajo de grado (graduación in Ingeniería Química) - Universidad de Cartagena, 2012.

GHEBREMICHAEL, K. Overcoming the drawbacks of natural coagulants for drinking water treatment. **Water Sci. Technol. Water Supply**, v. 7, n. 4, p. 87–93, 2007.

GOYCOOLEA, F. M.; CÁRDENAS, A. Pectins from *Opuntia spp.*: a short review. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, v. 5, p. 17-29, 2003.

GRANT, G. T.; MORRIS, E. R.; REES, D. A.; SMITH, P. J. C.; THOM, D. Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: the egg-box model. **FEBS Lett.**, v. 32, p. 195-198, 1973.

GRIM, R. E. **Clay Mineralogy**. New York: McGraw-Hill, p. 29, 1958.

HAUG, A. The affinity of some divalent metals to different types of alginates. **Acta Chem. Scand.**, v. 15, n. 8, p. 1794-1795, 1961.

LENZ, G. F.; PERUÇO, J. D. T.; THOMAZINI, M. H.; ROCHA, E. M. S.; MOTTA, C.

V.; ZARA, R. F. **Ação de polímero natural, extraído do cacto Mandacaru (Cereus jamacaru), no tratamento de água.** In: ExpoUT 2011, 2011, Toledo. III Encontro de Divulgação Científica e Tecnológica, 2011.

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

MACÊDO, J. A. B. **Águas & Águas.** 3ª edição. São Paulo: Livraria varela, 2007.

MANDLOI, M.; CHAUDHARI, S.; FOLKARD, G. K. Evaluation of natural coagulants for direct filtration. **Environmental Technology**, v. 25, n. 4, p. 481489, 2004.

MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPÄÄ, M.; Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review. **Advances in colloid and interface science**, v. 159, n. 2, p. 189-197, 2010.

MIRANDA-MEDINA, A.; PERALTA-PELÁEZ, L.; GONZÁLEZ-VALDÉS, A.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, M.; SÁNCHEZ-GARCÍA, M. Diseño de una planta productora de ácido algínico y alginatos a partir de *Azotobacter vinelandii*. **Tecnología, Ciencia, Educación**, v. 23, n. 2, p. 91-98, 2008.

MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, T. G. F. **Aptidão do Nordeste brasileiro ao cultivo da palma forrageira sob cenários de mudanças climáticas.** In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 3., 2011, Juazeiro. Experiências para mitigação e adaptação; anais. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. 1 CD-ROM. (Embrapa Semiárido. Documentos, 239). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/51605/1/Magna4.pdf>>. Acesso em: 02 de abril, 2015.

MUTHURAMAN, G.; SASIKALA, S. Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 1727-1731, 2014.

MUYIBI, S. A.; EVISON, L. M. Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with moringa oleifera Seeds. **Water Research**, v. 29, n. 12, p. 2689-2695, 1995.

NATHANSON, J. A. **Basic Environmental Technology.** Prentice Hall, 2008.

NEWCOMBE, G.; DIXON, D. **Interface Science in Drinking Water Treatment: Theory and Applications.** Academic Press, 2006.

NDABIGENGESERE A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G.; Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v. 29, n. 2, p. 703-10, 1995.

NISHI, L.; MADRONA, G. S.; GUILHERME, A. L. F.; VIEIRA, A. M. S.; ARAÚJO, A. A.; UGRI, M. C. B. A.; BERGAMASCO, R. Cyanobacteria removal by coagulation/flocculation with seeds of the natural coagulant *Moringa*

oleifera Lam. **Chem. Engin Trans.**, v. 24, p. 1129-1134, 2011.

OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M.; Improvement of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, v. 33, n. 15, p. 3373-3378, 1999.

OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, v. 35, n. 3, p. 830-834, 2001.

WHO/UNICEF - World Health Organization/UNICEF. **Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation: Progress on Drinking Water and Sanitation: 2012 Update**. 2012. 60 p.

ORTIZ, A. V.; ASTUDILLO, I. C.; MARTÍNEZ, G. J. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. **Revista Colombiana de Biotecnología**, v. 15, n. 1, p. 137-144, 2013.

PICHLER, T.; YOUNG, K.; ALCANTAR, N. Eliminating turbidity in drinking water using the mucilage of a common cactus. **Water Science & Technology: Water Supply**, v. 12, n. 2, p. 179-186, 2012.

PRITCHARD, M.; CRAVEN, T.; MKANDAWIRE, T.; EDMONDSON, A. S.; O'NEILL, J. G. A study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringa oleifera* in drinking water purification, **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 35, n. 13-14, p. 791-797, 2010a.

PRITCHARD, M.; CRAVEN, T.; MKANDAWIRE, T.; EDMONDSON, A. S.; O'NEILL, J. G. A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries, **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 35, n. 13-14, p. 798-805, 2010b.

PRÜSS-USTIN, A.; BOS, R.; GORA, F.; BARTRAM, J. **Safer Water, better health. Costs, benefits and sustainability of interventions to protect and promote health**. Geneva: Organização Mundial da Saúde, 2008. 53 p.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologias de Tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

SÁENZ, C.; VÁSQUEZ, M.; TRUMPER, S.; FLUXÁ, C. **Extracción y composición química de mucílago de tuna (*Opuntia ficus indica*)**, p. 93-96, in: Actas 2º Congreso Internacional de tuna y cochinilla. Santiago, Chile, 1992.

SÁENZ, C.; SEPÚLVEDA, E.; MATSUHIRO, B. *Opuntia* spp. mucilage's: a functional component with industrial perspectives. **Journal of Arid Environments**, v. 57, n. 3, p. 275-290, 2004.

SANTOS, M. V. F.; FERREIRA, M. A.; BATISTA, A. M. V. Valor nutritivo e utilização da palma forrageira. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (Ed.). **A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas**

de uso. Recife: Ed. Universitária da UFPE, p. 143-162, 2005.

SANTOS, D. C.; FARIAS, I.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; ARRUDA, G. P.; COELHO, R. S. B.; DIAS, F. M.; WARUMBY, J. F.; MELO, J. N.. **Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia e Nopalea*) em Pernambuco: cultivo e utilização.** Recife: IPA, 2006. 45p.

SEPÚLVEDA, E.; SAÉNZ, C.; ALIAGA, E.; ACEITUNO, C. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. **J. Arid Environ.**, v, 68, n. 4, p. 534-545, 2007.

SHILPA, B. S.; AKANKSHA, K.; GIRISH, P. Evaluation of cactus and hyacinth bean peels as natural coagulants. **International Journal of Chemical & Environmental Engineering**, v. 3, n. 3, 187-191, 2012.

SIMATE, G. S.; IYUKE, S. E.; NDLOVU, S.; HEYDENRYCH, M.; WALUBITA, L. F. Human health effects of residual carbon nanotubes and traditional water treatment chemicals in drinking water. **Environment International**, v. 39, n. 1, p. 38-49, 2012.

SPELLMAN, F. R. **Handbook of water & wastewater treatment plant operations.** CRC Press, 2003.

SNSA - Sistema Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2011.** Brasília: Ministério das Cidades. SNSA, 2013.

SUTHERLAND, J. P.; FOLKARD, G. K.; GRANT, W. D. Natural coagulants for appropriate water treatment: a novel approach. **Waterlines**, v. 8, n. 4, p. 30-32, 1990.

TORRES, L. G.; CARPINTEYRO-URBAN, S. L.; VACA, M. Use of *Prosopis laevigata* Seed Gum and *Opuntia ficus-indica* Mucilage for the Treatment of Municipal Wastewaters by Coagulation-Flocculation. **Natural Resources**, v. 3, p. 35-41, 2012.

TRACHTENBERG, S.; MAYER, A. M. Biophysical properties of *Opuntia ficus indica* mucilage. **Phytochemistry**, v. 21, n. 12, p. 2835-2843, 1980.

TRACHTENBERG, S.; MAYER, A. M. Mucilage cells, calcium oxalate crystals and soluble calcium in *Opuntia ficus indica*. **Annals of Botany**, v. 50, n. 4, p. 549-557, 1982.

VISSMAN, W.; HAMMER, M. J. **Water Supply and Pollution Control.** 8th edition. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

WANDERLEY, W. L.; FERREIRA, M. A.; ANDRADE, D. K. B.; VERAS, A. S. C.; FARIAS, I.; LIMA, L. E.; DIAS, A. M. A. Palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill) em substituição à silagem de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) na alimentação de vacas leiteiras. **Revista Brasileira Zootecnia**, v. 31, n. 1, p. 273-281, 2002.

WEBER JR., W. J. **Physicochemical Processes for Water Quality Control.** New York: John Wiley & Sons, 1972.

WHO/UNICEF - World Health Organization/UNICEF. **Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation: Progress on Drinking Water and Sanitation: 2012 Update**. 2012. 60 p.

YANG, Y.C.; ABDUL-TALIB, S.; PEI, L.Y.; ISMAIL, M.S.N.; ABD-RAZAK, S.N.A.; MOHD-MOHTAR, A.M. **A study on cactus *Opuntia* as natural coagulant in turbid water treatment**. *CSSR*, 6, p. 1–7, 2007.

YIN, C.-Y.; SUHAIMI, A.-T.; LIM, Y. P.; MOHD, S. N. I.; SITI, N. A.; AHMAD, M. **A Study On Cactus *Opuntia* As Natural Coagulant In Turbid Water Treatment**. In: Universiti Teknologi MARA - 4th Conference on Scientific and Social Research. Malásia, 2006.

YIN, C. Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, v. 45, p. 1437-1444, 2010.

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

ZHANG, J.; ZHANG, F.; LUO, Y.; YANG, H. A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. **Process Biochemistry**, v. 41, p. 730-733, 2006.

ZHANG, J. Protein-Protein Interactions in Salt Solutions. In: CAI, W.; HONG, H. (Ed.). **Protein-Protein Interactions - Computational and Experimental Tools**. Croatia: InTech, 2012. p.359-376.

ZIMMERMAN, J. B.; FUGATE, E. J.; CRAVER, V. O.; SMITH, J. A.; MILLER, S. M. Toward Understanding of *Opuntia* spp. As a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, p. 4274-4279, 2008.