



## 9485 - ESTUDO DA APLICAÇÃO DE *Opuntia cochenillifera* COMO AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO EM ÁGUA DE MANANCIAL SUPERFICIAL DE ALTA TURBIDEZ

**Kamila Jessie Sammarro Silva**<sup>(1)</sup> Mestranda em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP). Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG)

**Elizabeth Regina Halfeld da Costa**<sup>(2)</sup> Professora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG). Mestre e doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP).

**Andréa Rodrigues Marques Guimarães**<sup>(3)</sup> Professora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG). Mestre e doutora em Ecologia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

**Endereço**(1): Av. Trabalhador São Carlense, 400. CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil. Tel. (16) 3373-9561 (LATAR – PPGSHS –EESC/USP) e-mail: [kamilajessie@gmail.com](mailto:kamilajessie@gmail.com) / [kamilajessie@usp.br](mailto:kamilajessie@usp.br)

### RESUMO

A remoção de turbidez em águas é predominantemente realizada por tecnologias de tratamento que utilizam a coagulação. Polímeros vegetais constituem um insumo ambiental e economicamente interessante. Este trabalho buscou verificar a eficiência do extrato aquoso de cladódios do cacto *Opuntia cochenillifera* como auxiliar de floculação do cloreto férrico no tratamento de água de manancial com alta turbidez. Utilizou-se o extrato vegetal obtido pela secagem, moagem, diluição e posterior filtração. A clarificação da água foi realizada por jarreste, tendo como variáveis a de velocidade de sedimentação, dosagem de coagulante primário, pH da água bruta (AB) e concentração do extrato vegetal. Verificou-se que concentrações diferentes do extrato do cacto diminuíram significativamente ( $P < 0,001$ , ANOVA) o efeito do cloreto férrico na remoção de turbidez. A análise com todas as variáveis em conjunto mostrou que independente das concentrações dos extratos do vegetal e dos tempos de sedimentação, para as maiores dosagens de coagulante, o tratamento com pH 9 apresentou resultado significativamente melhor ( $P < 0,001$ , ANOVA). No entanto, concluiu-se que o uso de *O. 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. Sugere-se a realização de estudos com AB em diferentes condições e variadas concentrações de polímeros e pHs de coagulação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Auxiliar de floculação, polímero vegetal, tratamento de água

### INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

As estações de tratamento de água (ETAs) que operam com ciclo completo são as predominantes no Brasil (IBGE, 2010), envolvendo a etapa de coagulação química, a floculação e a sedimentação ou flotação, para posteriormente haver o polimento por filtros. Como agentes coagulantes, as ETAs brasileiras utilizam principalmente sais de alumínio (sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio) e de ferro (cloreto férrico, sulfato férrico e sulfato ferroso clorado) (PÁDUA, 2006). A eficácia destes coagulantes é satisfatória e bem delimitada, dependendo da qualidade da água, mas, apesar disso, 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, exigindo o ajuste de pH com alcalinizantes (CARDOSO, 2007). Outro fator é a geração de resíduos com maior teor de metais.

Neste cenário, buscam-se coagulantes alternativos ou auxiliares de floculação que sejam economicamente viáveis e ambientalmente aceitos (RAMOS, 2005), com o objetivo de reduzir ou substituir o uso de coagulantes químicos nas ETAs. Uma opção são os polímeros naturais, que, comparados aos sais metálicos, destacam-se por serem biodegradáveis e não-tóxicos, e ainda produzem lodo em menor quantidade e com menores teores de metais (BONGIOVANI et al., 2010).

De acordo com COSTA (2001), poucas ETAs 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 (AB), possibilitem obter uma água tratada com qualidade e em quantidade satisfatória, visando sempre obter o menor custo e melhor desempenho.

Há uma larga variedade de possibilidades de aplicação tratando-se de polímeros provenientes de extratos vegetais (COSTA; SILVA; GUIMARÃES, 2016). Quando utilizados como auxiliares, os polímeros vegetais promovem o acréscimo de tamanho, densidade, resistência e velocidade de sedimentação dos flocos formados (BOLTO; GREGORY, 2007; RICHTER, 2009).

Dentre os vegetais estudados, as cactáceas têm se destacado como potenciais coagulantes e auxiliares de floculação. Os cactos do gênero *Opuntia (Nopalea)* apresentaram eficiência na 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).

Este trabalho teve por objetivo 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, localizado no município de Nova Lima, MG.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **• Processamento da cactácea e preparo do coagulante natural**

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

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 processador doméstico sob potência de 300 W durante 5 min. 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.

As dosagens de estudo foram de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 g/L, em comparação ao jarro referente à ausência de cactácea, isto é, aplicação exclusiva de coagulante químico. A obtenção das doses aplicadas foi feita pela 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.

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. No teste de jarros, foram aplicadas alíquotas de 10 mL do filtrado correspondentes a cada dosagem de cactácea.

### **• Coleta e caracterização da água bruta**

A água bruta (AB) 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 afluenta à ETA e a turbidez e pH foram aferidos novamente antes de cada ensaio jarresteste. A tabela 1 apresenta as informações obtidas na Estação.



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

**Tabela 1 – Parâmetros da água bruta coletada no manancial Rio das Velhas, no ponto de captação**

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

#### • Condições dos ensaios jarteste

O coagulante químico adotado foi o cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), o qual foi preparado conforme solução de trabalho utilizada na ETA – Rio das Velhas, isto é, 0,2% p/v de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Esta baseou-se na diluição do produto cedido pela COPASA, com densidade 1,49 kg/L e concentração média de 17% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , conforme especificações fornecidas pelo fabricante e confirmadas pela companhia de saneamento. A solução foi mantida refrigerada e utilizada todos os dias por um período de aproximadamente duas semanas.

Considerando a turbidez da AB, a dosagem de coagulantes à base de sais férricos na ETA – Rio das Velhas seria em torno de 12 mg/L de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , de acordo com comunicação pessoal com os operadores da ETA e gráfico de trabalho verificado na COPASA. Na Estação, ocorre ajuste de pH por meio da adição de óxido de cálcio (cal) como agente alcalinizante, que também foi cedido pela COPASA para os ensaios de bancada.

O equipamento adotado na realização dos ensaios de bancada foi um agitador jarteste 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 ( $V_s$ ) estabelecida.

Os parâmetros adotados nos ensaios jarteste são função das características da água bruta e objetivos pleiteados (BOF, 2007). A Tabela 2 lista os valores adotados para cada parâmetro na realização dos ensaios para o presente trabalho.

**Tabela 2 - Parâmetros de operação adotados no ensaio de jarteste**

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

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 min, respectivamente.

Os ensaios de jarteste consideraram a ausência de cactácea na cuba 1 e as dosagens de  $5 \times 10^2$ ,  $1 \times 10^3$ ,  $1,5 \times 10^3$ ,  $2,0 \times 10^3$  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 *O. cochenillifera*, permitindo a comparação com a ação exclusiva do coagulante primário.

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. Trabalhou-se inicialmente com a



dosagem de cloreto férrico igual a 10 mg/L de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , i. e., 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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com a qual a COPASA opera. Em seguida, baixou-se tal concentração para 5 mg/L e então para 2 mg/L de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , com o objetivo de reduzir gradualmente a influência predominante da ação do coagulante primário.

Investigou-se o pH em torno de 7 (referente à AB) 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 em condições similares às de estudo.

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 min, 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.

#### • Estudo estatístico dos dados

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, a partir da qual se calculou 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 se realizou estudo estatístico.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios em três repetições, utilizou-se o software Statistica® 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.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios (três repetições) de cada parâmetro analisado (dosagem do coagulante, tempo de sedimentação, concentração do extrato vegetal e pH), utilizou-se o software Statistica® 7.0 para a realização do teste *one-way* ANOVA junto ao teste Tukey. Considerou-se a hipótese de que cada parâmetro interfere independentemente 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 interfeririam 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  $\text{FeCl}_3$ , 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.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 3 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 AB 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 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 *O. 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.

A turbidez média baseada nas aferições que antecederam cada ensaio jarteste correspondeu a 161,6 uT para a AB. Tal valor foi menor do que o obtido no campo no momento da coleta (237,0 uT), devido a alterações na qualidade da água, considerando-se o transporte e tempo de armazenagem.



**Tabela 3 - Efeito dos diferentes tratamentos sobre o pH**

Dosagem de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mg/L)	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

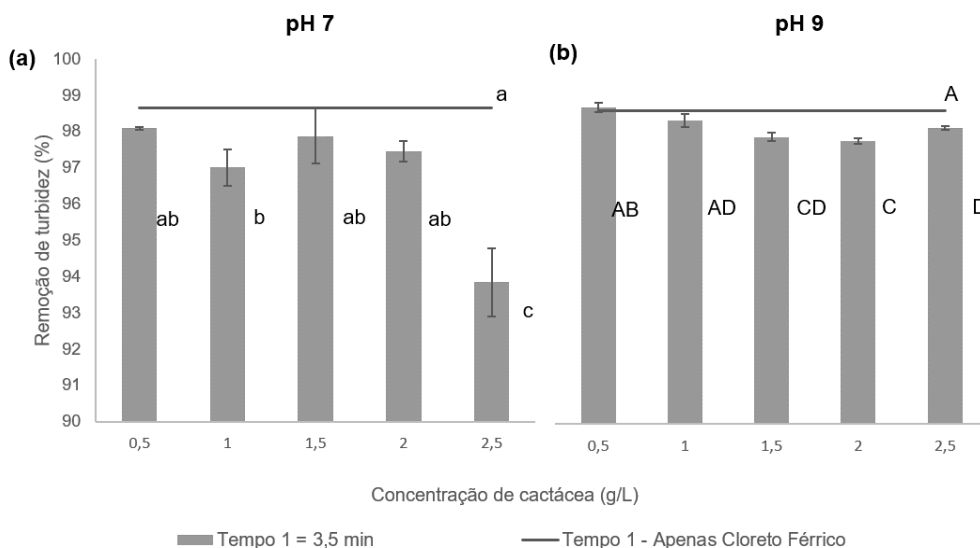
Os dados medidos para turbidez remanescente, convertidos em percentual de remoção, tiveram sua média aritmética apresentada graficamente junto às barras indicativas do desvio padrão para cada tratamento específico. Ratifica-se que, por tratamento, considerou-se a combinação dos fatores: tempo de coleta (representando a velocidade de sedimentação), dosagem de cloreto férrico, pH da água bruta e concentração de cactácea.

Nos gráficos das figuras 1, 2, 3, 4, 6, 7 e 8, 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.

- **Resultados para dosagem de 10 mg/L de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

As figuras 1, 2 e 3 registram a remoção de turbidez para o tratamento referente à dosagem de 10 mg/L de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nos pHs 7 e 9. Cada figura refere-se a um tempo de coleta, representando uma dada velocidade de sedimentação (Vs).

A Figura 1 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 x 10<sup>2</sup>, 1,5 x 10<sup>3</sup> e 2,0 x 10<sup>2</sup> mg/L foram iguais no pH 7 (figura 1 (b)), para a dosagem de cloreto férrico de 10 mg/L de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Contudo, nenhum dos resultados foi capaz de atingir a *baseline* referente à aplicação exclusiva de coagulante químico, sendo a concentração de 2,5 x 10<sup>3</sup> mg/L de cacto a mais distante de tê-lo feito. Essa inferência é corroborada, 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.



**Figura 1 - Efeito da concentração de cactácea no tratamento com cloreto férrico a 10 mg/L de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, para (a) pH 7 e (b) pH 9. Vs de 2,0 cm/min. (a) F=26,26 e P>0,0001 (b) F=33,67 e P<0,0001**



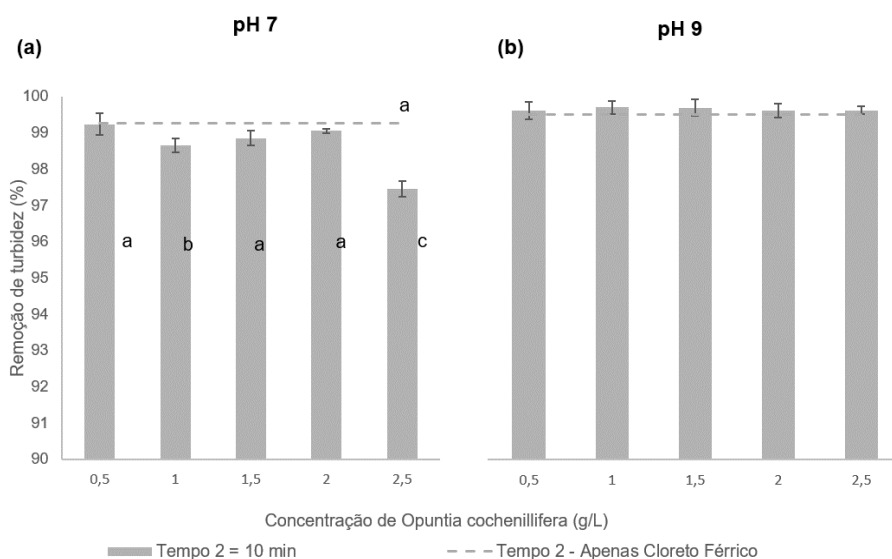
Quanto ao pH 9, representado pela Figura 1 (b), para dosagem de cloreto férrico de 10 mg/L, foram obtidas melhores remoções de turbidez para a aplicação de cactácea em geral (98,8%), se comparadas ao pH 7, que apresentou uma média de remoção de 96,8%. Entretanto, verificou-se que as remoções foram próximas 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.

A análise da Figura 2 (a) indica que, decorridos 10,0 min de sedimentação no aparelho jarreste, 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  $5 \times 10^2$ ,  $1,5 \times 10^3$  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 *O.cochenillifera* mais concentrada ( $2,5 \times 10^3$  mg/L) manteve-se como significativamente diferente das demais, gerando menor remoção de turbidez.

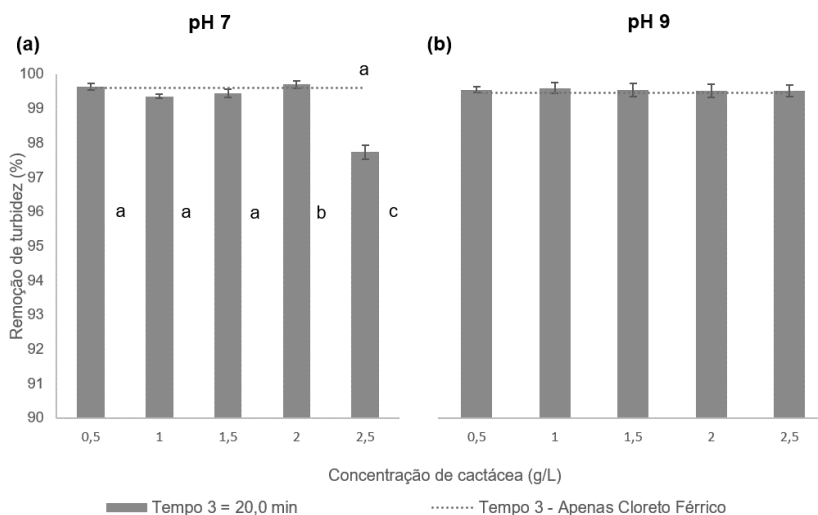
O tratamento com pH 9 e 10 mg/L de  $Fe_2O_3$ , representado na Figura 2 (b) não apresentou diferença significativa na remoção de turbidez em função da concentração, quando realizada a ANOVA. O resultado da análise de variância associa-se ao fato de a turbidez remanescente em todas as cubas ter sido 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; ALIU, 2008). Além disso, Miller *et al.* (2008) mostraram 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  $V_s$  igual a 0,35 cm/min, representada figura 3. 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 min. 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 min ( $V_s$  de 0,7 cm/min).



**Figura 2 - 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.  $V_s$  de 0,7 cm/min. (a)  $F = 33,67$  e  $P < 0,0001$ ; (b) Não foi significativamente diferente.**



**Figura 3 - 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. Vs 0,35 cm/min. (a)  $F=129,02$   $P<0,001$ ; (b) Não foi significativamente diferente.**

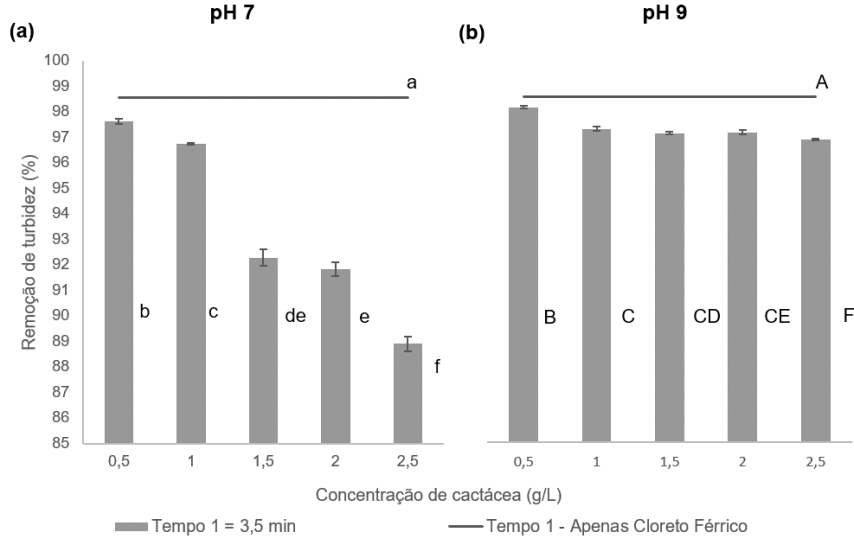
- **Resultados para dosagem de 5 mg/L de  $Fe_2O_3$**

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 4, 6, e 7. 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 depois de reduzida para 5 mg/L de  $Fe_2O_3$  foi, portanto, capaz de exercer a remoção das partículas coloidais da água. Na presente situação, o uso de auxiliar de floculação não foi pertinente para melhorar sua eficiência, já suficiente.

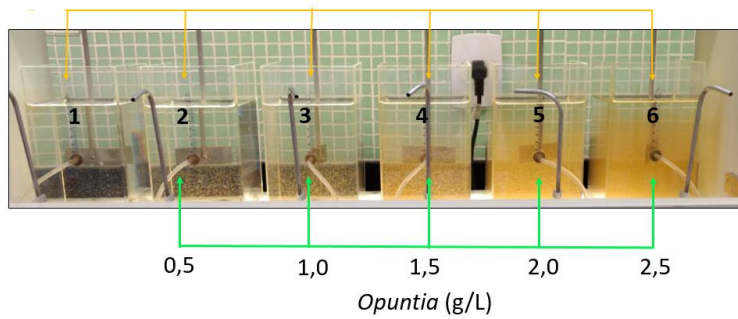
Enfatizando os resultados para o ensaio com pH 7, do ponto de vista estatístico, é possível inferir que diferentes concentrações de cactácea promoveram diferentes remoções de turbidez. Visualmente, a cuba que trabalhou com a maior concentração de *Opuntia cochenillifera* apresentou os resultados mais baixos de remoção (Figura 5), 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; ALIU, 2008).

As menores vs, abordadas nas figuras 6 e 7 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  $5 \times 10^2$  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.

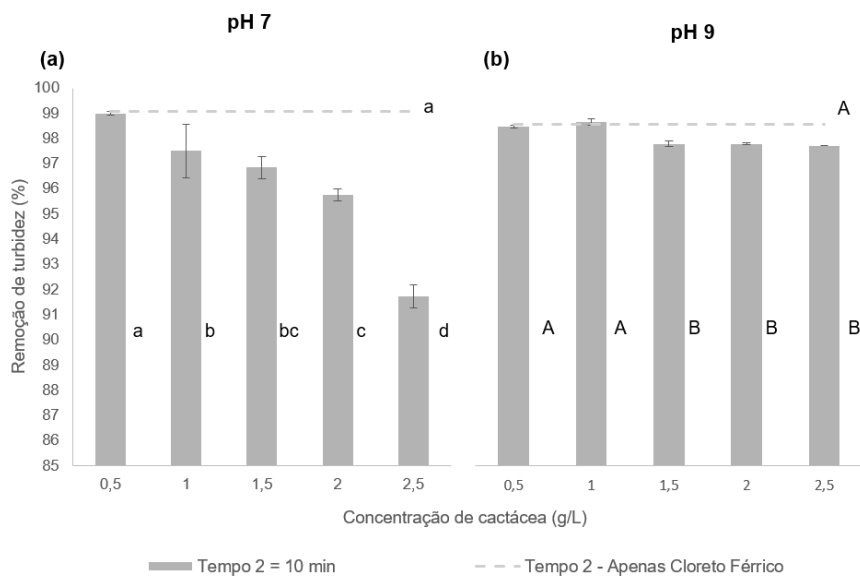
Para ambas as velocidades de sedimentação de 0,7 e 0,35 cm/min (tempos 1 e 2, respectivamente), foram notados melhores valores de remoção, tal como ocorrido com o cacto associado a uma dosagem maior de cloreto férrico, isto é, 10 mg/L de  $Fe_2O_3$ . Novamente, infere-se que isso se deva à sedimentação 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 4 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em (a) pH 7 e (b) pH 9. Vs de 2,0 cm/min. (a) F=956,44 P<0,0001 (b) F=324,44 P<0,0001**

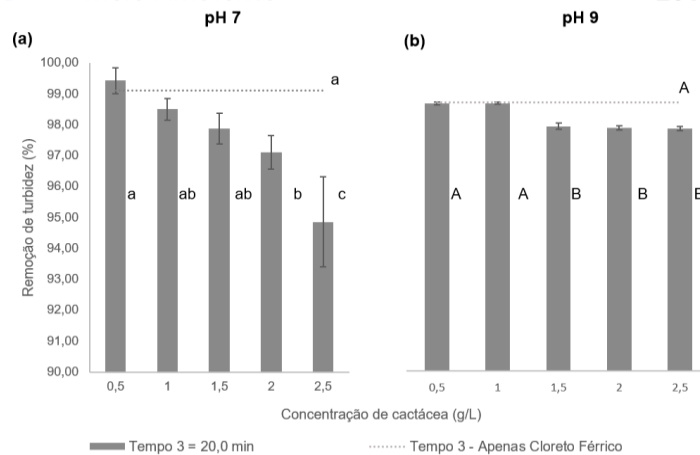


**Figura 5 - Sedimentação dos flocos no ensaio com 5 mg/L de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e pH 7**



**Figura 6 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em (a) pH 7 e (b) pH 9. Vs de 0,7 cm/min. (a) F=83,81 P<0,0001; (b) F=109,26 P<0,0001**





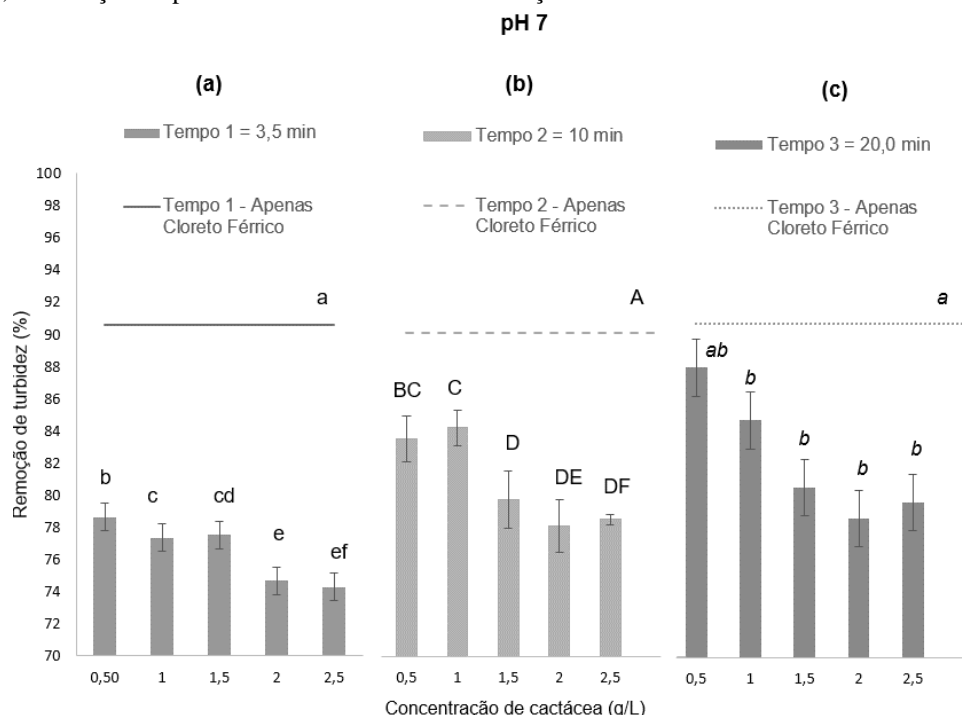
**Figura 7 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 5 mg/L de  $Fe_2O_3$  em a) pH 7 e (b) pH 9. Vs de 0,35 cm/min. (a)  $F=16,9$   $P<0,0001$ ; (b)  $F=154,62$   $P<0,0001$**

- Resultados para a dosagem de 2 mg/L de  $Fe_2O_3$**

O experimento que considerou a dosagem de coagulante químico de 2mg/L de  $Fe_2O_3$  tem seus resultados apresentados na figura 8, 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 8 permite verificar que nenhuma das cubas com *O. 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 8 (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,  $5 \times 10^2$  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.

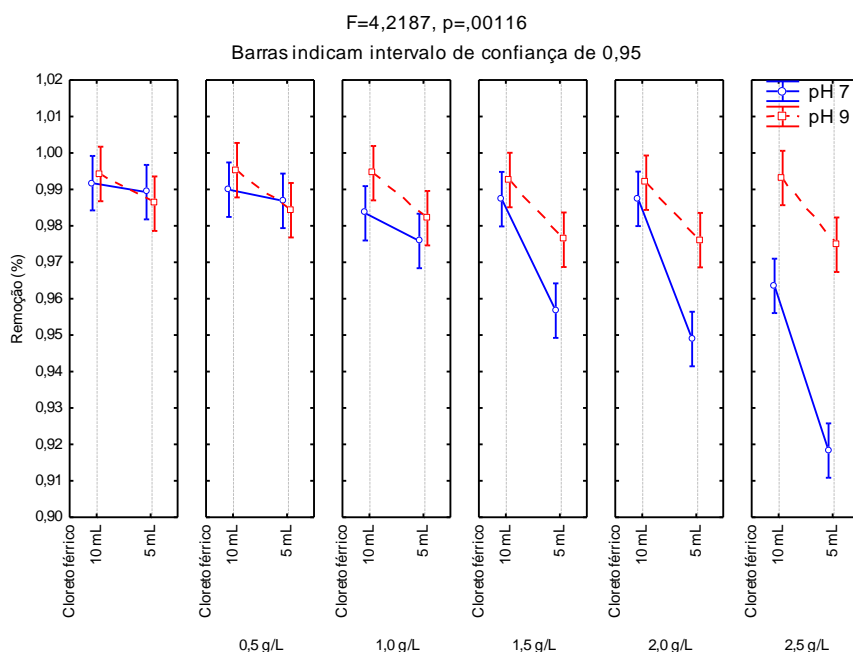


**FIGURA 8 - Efeito da concentração de cactácea na remoção de turbidez com uso de 2 mg/L de  $Fe_2O_3$  em pH 7 nas velocidades de sedimentação (a) 2 cm/min, (b) 0,7 cm/min e (c) 0,35 cm/min. (a)  $F = 785,26$   $P < 0,0001$ ; (b)  $F = 40,69$   $P < 0,0001$ ; (c)  $F = 18,62$   $P < 0,0001$**



- **Influência do pH e concentração de coagulante químico**

O resultado obtido para a ANOVA fatorial é representado no gráfico da Figura 9. A partir desta, é possível verificar estatisticamente que a redução na dosagem de cloreto férrico (onde os valores em mL aplicados no jarreste 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 9 - Efeito do pH sobre a remoção de turbidez nas diferentes concentrações de cactácea e aplicação de dosagens de 10 e 5 mg/L de  $Fe_2O_3$**

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 auxiliar, 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 *O. cochenillifera*, a Figura 9 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 em que 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, onde predominava baixa turbidez. No referido estudo, que considerou turbidez inicial de 9,64 uT, a aplicação de sulfato ferroso clorado como coagulante primário em conjunto com a *O. cochenillifera* foi eficiente, na medida em que a concentração de cactácea de 1000 mg/L registrou turbidez remanescente de 0,74 uT (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 é 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.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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, pois todas as remoções foram inferiores ao uso de cloreto férrico por si só. 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.

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 doses 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 *O. 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.

A disposição de resultados de remoção de turbidez pode ser feita na forma de diagrama de coagulação, permitindo uma amplitude maior de compreensão das variáveis, visando possibilitar escolhas mais adequadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) pelo fornecimento do volume de água utilizado no presente estudo, bem como pelo coagulante primário e alcalinizante aplicados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. BOLTO, B; GREGORY, J. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, v. 41, n. 11, p.2301-2324, jun. 2007.
3. BONGIOVANI, 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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 CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 34., 2014, Cidade do México. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2014.
7. 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 CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 35., 2016, Cartagena de Índias. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2016.
8. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
9. MILLER, 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.
10. OLADOJA, NA; ALIU, YD. Evaluation of Plantain Peelings Ash Extract as Coagulant Aid in the Coagulation of Colloidal Particles in Low pH Aqua System. *Water Quality Research Journal of Canada (Canadian Association on Water Quality)*. 43, 2/3, 231-238, Apr. 2008.
11. OLADOJA, et al.. Headway on natural polymeric coagulants in water and wastewater treatment operations. *Journal Of Water Process Engineering*, v. 6, p.174-192, jun. 2015.
12. 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.
13. 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.
14. RITCHER, C. A. Água: métodos e tecnologias de tratamento. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2009. 333p.
15. VERBEL, Rafael Enrique Olivero et al. Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *Avances Investigación en Ingeniería*, Bogotá, v. 11, n. 1, p.71-77, jun. 2014.
16. 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.