Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X

http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

COMPARAÇÃO ENTRE O COAGULANTE NATURAL TANINO E OS COAGULANTES INORGÂNICOS PAC E CLORETO FÉRRICO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS

Henrique Straioto [1]
Alexandre Amado de Moura [1]
* Ricardo Nagamine Costanzi [2]

COMPARISON BETWEEN THE NATURAL COAGULANT TANNIN AND THE INORGANIC COAGULANTS PAC AND FERRIC CHLORIDE, FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM THE PLASTIC RECYCLING INDUSTRY

Recibido el 13 de abril de 2021. Aceptado el 14 de septiembre de 2021

Abstract

The present research sought to carry out the treatment of an effluent from the plastic washing processes, present in a recycling industry. For this purpose, the performance of the natural tannin coagulant in relation to the inorganic coagulants of polyaluminium chloride (PAC) and ferric chloride was analyzed. The parameters studied were related to the removal of apparent color, turbidity and COD. The bench scale treatment consisted of the physical-chemical processes of coagulation, flocculation and sedimentation, and the determination of the amount of tests required and the processing of the results obtained were carried out using the Statistica software. The test variables were the coagulant dosages and the coagulation pH, and after the discovery of the ideal treatment, the performance of the tannin coagulant in relation to the removal of phosphorus, nitrogen, suspended solids and total solids, as well as changes in conductivity and alkalinity were also verified. All coagulants reached results of removing turbidity, apparent color and COD above 97%, with emphasis on tannin, which in addition to exceeding 99%, facilitates the disposal of sludge, as it is a biodegradable coagulant.

Keywords: coagulation, flocculation, natural coagulant, sustainability, wastewater treatment.

[1] Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá - PR, Brasil.
[2] Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina - PR, Brasil.
* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida dos Pioneiros, 3131, Bloco B, Sala B301, Londrina - PR, Brasil. Email: ricardocostanzi@gmail.com; ricardocostanzi@utfpr.edu.br

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

Resumo

A presente pesquisa buscou realizar o tratamento de um efluente proveniente dos processos de lavagem de plástico, presentes em uma indústria de reciclagem. Para isso, foi analisado o desempenho do coagulante natural tanino em relação aos coagulantes inorgânicos cloreto de polialumínio (PAC) e do cloreto férrico. Os parâmetros estudados foram em relação à remoção de cor aparente, turbidez e DQO. O tratamento em escala de bancada foi composto pelos processos físico-químicos de coagulação, floculação e sedimentação, sendo que a determinação da quantidade de ensaios necessária e o processamento dos resultados obtidos foram realizados através do software *Statistica*. As variáveis dos ensaios foram as dosagens de coagulante e o pH de coagulação, sendo que depois da descoberta do tratamento ideal, o desempenho do coagulante tanino em relação a remoção de fósforo, nitrogênio, sólidos suspensos e sólidos totais, bem como alterações na condutividade e alcalinidade também foram verificados. Todos coagulantes chegaram a resultados de remoção de turbidez, cor aparente e DQO superiores a 97%, com destaque para o tanino, que além de superar os 99%, facilita o descarte do lodo, por ser um coagulante biodegradável.

Palavras chave: coagulação, coagulante natural, floculação, sustentabilidade, tratamento de água poluída.

Introdução

Atualmente, sabe-se da necessidade de aplicar processos sustentáveis em praticamente todas as áreas de atuação do ser humano. Com produção mundial de 335 milhões de toneladas no ano de 2016 (Plástics Europe, 2018), os resíduos plásticos são materiais que podem e devem ser reciclados, já que além de sua origem fóssil, apresentam um longo tempo de decomposição no meio ambiente.

Dentre os processos de reciclagem de plástico, pode haver a necessidade de uma etapa de lavagem. O descarte da água residual desta lavagem pode ser feito por empresas especializadas, mas nem sempre isso é possível ou viável financeiramente, então as empresas podem realizar o seu tratamento, seja para o correto descarte na rede de esgoto ou para o reúso, tomando os cuidados necessários para obedecer às leis e diretrizes locais e globais (Salgot e Folch, 2018). O reaproveitamento dessas águas residuais se mostra cada vez mais importante, principalmente em locais onde que convivem com problemas relativos à escassez de água.

Apesar da constante exploração de diversas técnicas avançadas para o tratamento de água e efluentes, os mecanismos de coagulação e floculação ainda são encontrados em grande parte das estações de tratamento. Como é comum observar a utilização de polímeros sintéticos e sais de alumínio ou ferro para estes processos, podemos encontrar inúmeras pesquisas relacionadas à substituição destes produtos inorgânicos por coagulantes naturais (Arismendi *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2019).

Diversos fatores explicam esta busca pela substituição dos coagulantes. Entre as principais, encontra-se a constante associação dos produtos inorgânicos a doenças cancerígenas e ao mal de Alzheimer, bem como as dificuldades no descarte do lodo contaminado. Por outro lado, os

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

produtos naturais geralmente geram um lodo biodegradável e vêm apresentando resultados satisfatórios para o tratamento de águas residuais de diversas fontes, além de possibilitar a aplicação de técnicas de reúso em determinados casos (Beltrán-Heredia e Sánchez-Martín, 2009; Zaneti *et al.*, 2013; Dotto *et al.*, 2019)

Saleem e Bachmann (2018) mostram o aumento de pesquisas relacionadas a coagulantes naturais para o tratamento de água nos últimos anos. Próximo à década de 1990 praticamente inexistiam pesquisas sobre este assunto. No início dos anos 2000, observaram o aumento para cerca de 20 trabalhos, enquanto atualmente já são conhecidas quase 200 publicações.

Entre os coagulantes naturais, podemos destacar um produto derivado de algumas espécies de árvores, que é o tanino. Segundo Sánchez-Martín *et al.* (2010) e Lopes *et al.* (2019), este coagulante pode ser extraído de folhas, cascas, frutas, madeira, semente ou raízes, e geralmente tem como fonte a *Acacia mearnsii* e a *Schinopsis balansae*.

Dessa forma, o presente trabalho visa verificar a eficiência do tratamento de efluente de uma indústria de reciclagem de plástico, pelos processos de coagulação, floculação e sedimentação. Foram testados os coagulantes cloreto férrico, cloreto de polialumínio (PAC) e tanino, utilizando-se um planejamento estatístico em que a variável resposta foi o percentual de remoção, visando a otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação na remoção de turbidez, cor aparente e demanda química de oxigênio (DQO), buscando a adequação do efluente perante os limites de lançamento de águas residuais na rede coletora de esgoto e os aplicados para o reúso em indústrias.

Metodologia

Para a realização deste trabalho, realizaram-se duas coletas de efluente no tanque de lavagem de uma empresa de reciclagem de plásticos. Esta empresa realiza a lavagem em processos de batelada, e após a saturação da água de lavagem (seja pela cor indesejada ou pela propagação de odor), apresentam a necessidade do tratamento do efluente, para seu correto descarte ou reúso. Este efluente foi armazenado em galões plásticos devidamente limpos, e posteriormente armazenados em um freezer horizontal (Consul, modelo CHB42DBBNA), visando manter sua temperatura entre 0 e 4 ºC, para evitar sua degradação até a realização dos ensaios de tratamento. O efluente da primeira coleta foi utilizado para a realização dos ensaios de remoção de turbidez, cor aparente e DQO para os três coagulantes testados. Após a realização dos ensaios e análise dos resultados, realizou-se uma segunda coleta do efluente, visando analisar a eficiência de remoção de fósforo total, nitrogênio Kjeldahl total (NKT), série de sólidos, cor aparente, turbidez, DQO e variações de pH, condutividade elétrica e alcalinidade ao aplicar o melhor coagulante na dosagem e pH ótimos obtidos pelos ensaios anteriores.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

As análises deste trabalho foram realizadas de acordo com as recomendações dos métodos 2120 C (cor aparente), 5220 D (DQO), 4500 H+ B (pH), 2130 B (turbidez), 2540 B (sólidos totais), 2540 D (sólidos suspensos), 2540 E (sólidos fixos e voláteis), 4500 P (fósforo total), 4500 NH_3 (nitrogênio), 2510 B (condutividade elétrica) da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). A alcalinidade foi realizada através do método volumétrico por titulação. Os equipamentos utilizados para os ensaios foram: aparelho jar-test (218-6, Nova Ética), turbidímetro (AP 2000, Policontrol), medidor de pH de bancada (mPA 210, MS Tecnopon), destilador de nitrogênio (SL-40, Solab Científica), bloco digestor de DQO (BT 750, Biothec) e as leituras de cor aparente e de DQO utilizaram espectrofotômetros (DR 5000 e DR 2800, respectivamente), ambos da Hach.

Como pela literatura temos grandes variações nos métodos de ensaio do jar-test, os tempos de mistura rápida, lenta e sedimentação e gradientes de rotação dos eixos de mistura rápida ou lenta, foram determinados após a realização de pré-testes, definindo o modelo de trabalho apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Método de trabalho utilizado no equipamento de jar-test.

Etapa	Tempo	Gradiente	Característica
1	1 min	350/s	Mistura rápida
2	10 min	70/s	Mistura lenta
3	5 min	65/s	Mistura lenta
4	5 min	55/s	Mistura lenta
5	30 min	-	Sedimentação

Após as etapas de mistura, aguardava-se 30 minutos de tempo de sedimentação, e tinha-se a aplicação dos métodos analíticos para a obtenção dos resultados. Sánchez-Martín *et al.* (2010) confirmam a necessidade de um estudo preliminar sobre cada efluente a ser tratado, para a determinação dos parâmetros ótimos de tratamento.

Foram realizadas diversas combinações de pH de coagulação pela dosagem de coagulantes, visando comparar a eficácia do coagulante tanino (modificado pela empresa brasileira Tanac S. A., comercializado como Tanfloc SG) perante o cloreto férrico (CLD 2735, DND Química Eireli) e o PAC (PCA 2703, DND Química Eireli). As soluções de tanino foram preparadas misturando-se a massa desejada com água ultrapura durante 1 hora em um agitador magnético (IOGEN, LS59-110P). A quantidade de alumínio presente na solução de PAC e de ferro presente na solução de $FeCl_3$ foi calculada através do teor desses compostos fornecidos pela bula do fabricante. A Tabela 2 apresenta os pontos de trabalho determinados pelo delineamento composto central rotacional (DCCR), buscando a determinação do pH que cada coagulante trabalha com maior eficiência, bem

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

como a dosagem de coagulante que atinge melhores resultados de tratamento. O pH de coagulação inicial foi regulado através da utilização de soluções de H_2SO_4 e NaOH da marca Alphatec, em concentração de 0,1 N.

Tabela 2. Relação entre os pontos de trabalho determinados pelo método DCCR e as variáveis independentes.

Pontos axiais e ponto central	pH de coagulação	Dosagem de tanino (mg/L)	Dosagem de PAC (mg Al/L)	Dosagem de $FeCl_3$ (mg Fe/L)
-1.41	5.80	20.00	13.24	6.03
-1.00	6.19	37.50	29.12	18.08
0.00	7.14	80.00	66.18	42.18
1.00	8.09	122.50	103.24	66.28
1.41	8.48	140.00	119.12	78.33

Para a determinação dos parâmetros ótimos do tratamento, utilizou-se como parâmetro de resposta do planejamento estatístico o percentual de remoção de cor aparente, turbidez e DQO. O percentual de remoção desses parâmetros foi calculado através da Equação 1.

$$R = 100-(100.(V_F/V_I)) \qquad \textbf{Equação 1}$$

Onde: R = remoção (%); V_I e V_F = valores iniciais e finais de turbidez, cor ou DQO (UNT, uH ou mg O_2/L, respectivamente).

Visando a comprovação da eficiência do modelo de tratamento proposto, realizou-se uma segunda coleta de efluente na empresa, o qual tinha passado por etapas de lavagem mais severas, e por consequência maiores índices de turbidez, cor e DQO. O tratamento do efluente da segunda coleta foi realizado apenas na condição ótima de tratamento apresentada pela ferramenta *desirability* software *Statistica* resultante dos ensaios com o efluente da primeira coleta (melhor coagulante em sua dosagem e pH de coagulação ideais). Entretanto, nessas condições ótimas, para o efluente da segunda coleta, além de pH, cor aparente, DQO e turbidez, também avaliou-se a série de sólidos, nitrogênio, fósforo, alcalinidade e condutividade elétrica.

Resultados e discussão

Caracterização do efluente

As principais características do efluente referente à primeira coleta na indústria de reciclagem estão apresentadas na Tabela 3. Apesar de tratar-se de uma única amostra, antes de cada ensaio foi realizada a verificação de cor aparente, turbidez, pH e DQO do efluente bruto, possibilitando

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

calcular a média de tais parâmetros, visto que o efluente apresentava grande heterogeneidade, ainda que tenha sido realizada a homogeneização do efluente com um misturador mecânico (Sppencer, SP144-23) antes do mesmo ser armazenado. Como o pH do efluente bruto se encontrava próximo ao neutro, em grande parte dos ensaios não houve a necessidade de correção de pH, facilitando a realização do tratamento, visto que o pH central do planejamento experimental foi 7.14 e encontra-se dentro das faixas mais efetivas de atuação dos coagulantes indicadas pelos fabricantes (entre 4 e 10 para o PAC, 6 e 9 para o cloreto férrico e 4.5 a 8 para o tanino).

Tabela 3. Características do efluente bruto da primeira coleta na indústria de lavagem de plástico.

Parâmetro	Média
Cor aparente (uH)	772.13 ± 100.83
Turbidez (UNT)	311.33 ± 53.80
pH	7.00 ± 0.10
DQO (mg O_2/L)	1993.73 ± 426.56

Tratamento utilizando o coagulante tanino

A eficiência nas remoções de turbidez, cor aparente e DQO foram avaliadas de acordo com duas variáveis (dosagem de coagulante e pH de coagulação). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4. Observa-se que a combinação menos satisfatória de tratamento foi encontrada ao aplicar uma sobredose de coagulante, principalmente em relação à remoção de cor aparente.

Tabela 4. Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e DQO utilizando o coagulante tanino, com variações entre as dosagens de coagulante e o pH de coagulação.

Parâmetro	Ensaios realizados e resultados obtidos								
Dosagem de coagulante (mg/L)	20.0	37.5	37.5	80.0	80.0	80.0	122.5	122.5	140.0
pH corrigido para coagulação	7.14	6.19	8.09	5.80	7.14	8.48	6.19	8.09	7.14
Remoção de turbidez (%)	98.94	99.20	98.75	99.12	99.57	99.63	98.33	99.63	95.63
Remoção de cor aparente (%)	97.11	99.37	99.06	99.21	98.27	99.69	98.58	99.84	82.89
Remoção de DQO (%)	98.80	98.76	98.20	99.06	99.28	98.61	95.86	98.65	96.99

Através do software *Statistica*, podemos realizar a combinação dos resultados apresentados na Tabela 1 e gerar os gráficos que facilitam a observação dos pontos ótimos de dosagem de coagulante e pH de coagulação. A Figura 1a apresenta um modelo de gráfico do DCCR de 5 pontos. Já a Figura 1b mostra os resultados na remoção de turbidez obtidos pelo tratamento com o coagulante tanino.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

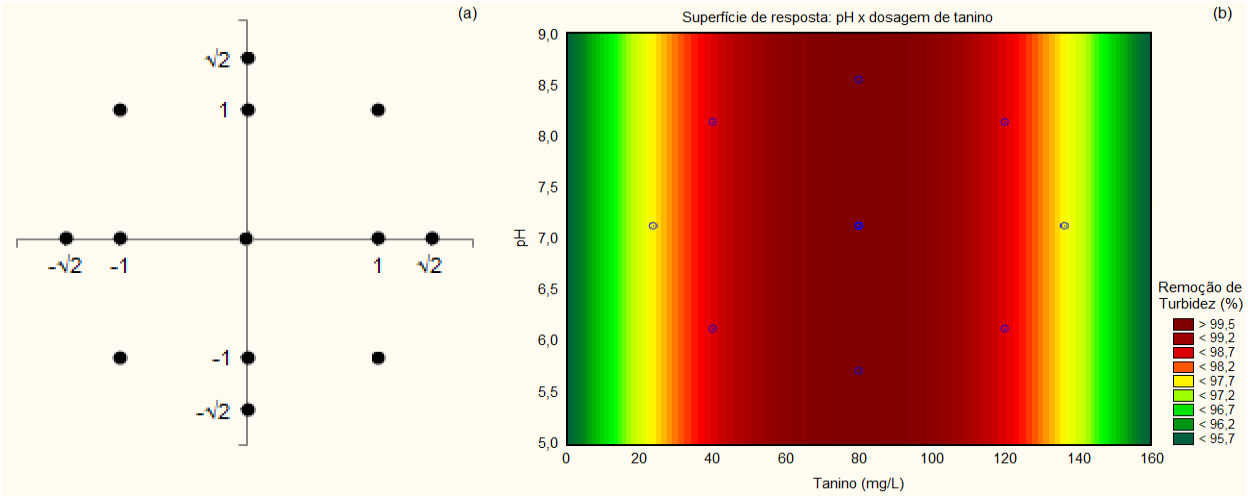

Figura 1. Exemplo de gráfico do DCCR (a) e gráfico de resposta com melhores parâmetros para a eficiência na remoção de turbidez com o coagulante tanino (b).

Observa-se pela Figura 1b que a dosagem de coagulante é o principal parâmetro a ser controlado, enquanto o pH de coagulação não mostrou interferências no processo. Também é interessante que mesmo fora dos pontos ideais de trabalho, as taxas de remoção de turbidez permanecem altas, e consequentemente, a eficiência média de remoção de turbidez obtida pelos ensaios é satisfatória (98.92%), com turbidez residual de 3.35 NTU.

A Figura 2 mostra que o pH também não teve grande impacto na remoção de cor aparente, mas influenciou nos resultados de DQO. A eficiência média de remoção de cor foi de 97.40% e DQO 98.50%, com resultados residuais médios de 20.08 uH e 29.86 mg O_2/L, respectivamente.

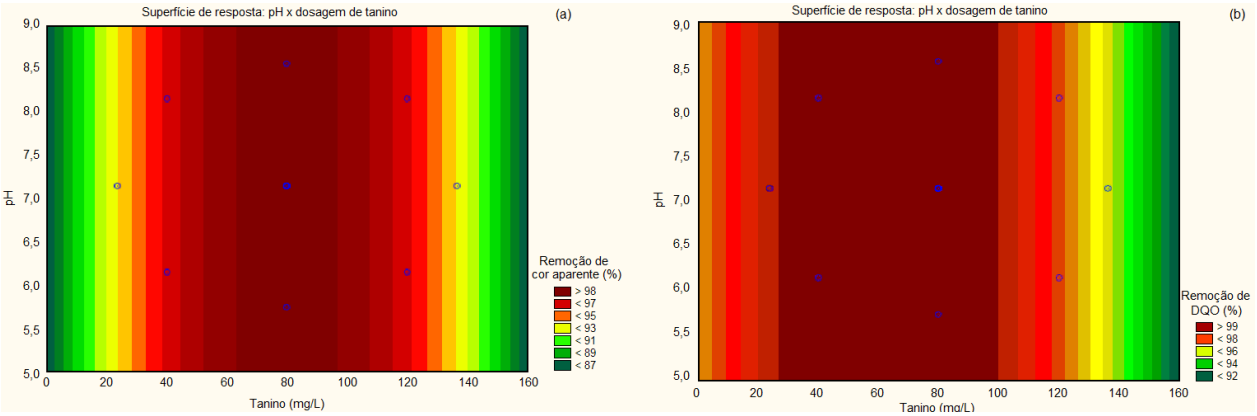

Figura 2. Gráfico de resposta com melhores parâmetros para a eficiência na remoção de cor aparente (a) e DQO (b) com o coagulante tanino.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

Os resultados obtidos pare remoção de turbidez, cor e DQO se mostram satisfatórios se comparados aos resultados obtidos pelo tratamento com tanino em efluentes de outras fontes. Dela Justina *et al.* (2018) com um efluente de laticínio (Média do efluente: turbidez 763.84 UNT, cor: 837.20 uH e DQO: 8042.60 mg O_2/L), chegaram a remoção de 89.4% de turbidez e 78.5% de cor aparente, com dosagem de coagulante de 300 mg/L. A remoção de DQO máxima foi de 41.6% aplicando 300 mg/L.

Hameed *et al.* (2016) usaram dosagem de 35 mg/L, enquanto Beltrán-Heredia e Sánchez-Martín (2009) com cerca de 100 ppm de coagulante para atingirem resultados semelhantes no tratamento de águas residuais municipais, com eficiências na remoção de turbidez superior a 90% e de DQO próxima a 60%. Estes autores não estudaram possíveis variações no parâmetro de cor aparente.

Kuo Huang *et al.* (2019) realizaram o tratamento de efluentes provenientes da indústria de lavanderia. Com dosagens de 140 mg/L, chegaram a remoção de 93.07% de turbidez, 95.44% de cor e 60% de DQO. Entretanto, tais autores decidiram por inserir etapas de adsorção e microfiltração para aumentar a eficiência do tratamento.

Para um efluente da indústria têxtil, Couto Junior *et al* (2013) utilizaram a dosagem de 400 mg/L, conseguindo remoções entre 98.68 e 99.65% para turbidez, entre 98.79 e 99.17% para cor aparente e para DQO entre 86.69 e 94.81%.

Outros coagulantes naturais também vêm sendo estudados para substituírem os coagulantes inorgânicos. Para o tratamento do efluente de indústria têxtil, Dotto *et al.* (2018) utilizaram sementes de *Moringa oleifera* e chegaram a remoções de turbidez, cor e DQO superiores as obtidas ao aplicar o sulfato de alumínio como coagulante.

Sánchez-Martín *et al.* (2010) realizaram o tratamento de diferentes águas residuais com o coagulante tanino em escala piloto. Simulando o efluente de indústria têxtil, atingiram remoção de corantes entre 50 e 60%. Para os esgotos municipais, verificaram a remoção aproximada de 25% de DQO e 52% de turbidez. Já tratando águas superficiais, observaram a remoção de turbidez na faixa de 50-60%.

Também para o tratamento de águas superficiais, Sánchez-Martín *et al.* (2010) relatam remoção de turbidez com tanino atingindo até 90%, superior a que é comummente alcançada por sulfato de alumínio. Também relatam a remoção de 30% da matéria orgânica. Os autores utilizaram dosagem de coagulante próxima a 20 mg/L em pH neutro.

Tratamento utilizando o coagulante PAC

Utilizando-se do coagulante PAC, podemos observar pela Tabela 5 que a inserção de coagulante em excesso pode reduzir a capacidade de tratamento, fato explicado pela baixa alcalinidade do efluente do presente estudo, e consequente redução do pH ao aplicar maiores dosagens de

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

coagulante. Observa-se também a alta eficiência do tratamento, atingindo remoções de 99.29% de turbidez, 97.87% de cor aparente e 99.25% de remoção de DQO, dependendo das variáveis independentes aplicadas.

Tabela 5. Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e DQO utilizando o coagulante PAC, com variações entre as dosagens de coagulante e o pH de coagulação.

Parâmetro	Ensaios realizados e resultados obtidos								
Dosagem de coagulante (mg/L)	13.24	29.12	29.12	66.18	66.18	66.18	103.24	103.24	119.12
pH corrigido para coagulação	7.14	6.19	8.09	5.80	7.14	8.48	6.19	8.09	7.14
Remoção de turbidez (%)	99.29	93.65	97.88	90.48	93.57	98.24	93.30	92.59	86.07
Remoção de cor aparente (%)	97.80	94.53	97.87	85.73	83.17	95.33	86.67	81.60	67.52
Remoção de DQO (%)	98.65	98.31	98.01	98.27	98.08	98.35	99.25	98.23	95.17

Como cada tipo de efluente apresenta suas particularidades, encontra-se na literatura diferentes eficiências de tratamento com este coagulante. Dela Justina *et al.* (2018) que também utilizaram o PAC para o tratamento do efluente de laticínio, superando os 90% na remoção de turbidez, 80% para cor aparente e 50% para DQO (dosagens de coagulante de 500 ou 600 mg/L). Já Hameed *et al*. (2016) chegaram a remoção de turbidez entre 86 e 87%, além de indicar a remoção de DQO próxima a apresentada ao utilizar o tanino como coagulante (cerca de 60%). Estes resultados foram semelhantes aos de Beltrán-Heredia e Sánchez-Martín (2009) com o mesmo tipo de efluente.

Para águas residuais de biodiesel, Daud *et al.* (2015) utilizaram a dosagem de 300 mg/L, obtendo remoção de 95% da cor e 81% da DQO. Já o tratamento do licor negro das fábricas de papel e celulose, apresentou eficiência nas remoções de cor de 52%, enquanto para DQO foi de apenas 14% (Irfan et al., 2017).

Os melhores valores atingidos com o coagulante PAC para os parâmetros de turbidez, cor aparente e DQO foram de 2.0 UNT, 15 uH e 14.99 mg O_2/L, respectivamente. Para turbidez dos ensaios com PAC, verificou-se que o pior resultado obtido foi de 39 UNT, para cor 221 uH e DQO de 96.34 mg O_2/L.

A visualização dos melhores pontos de tratamento é facilitada quando se observa os gráficos de eficiência de tratamento. Os pontos ótimos para o tratamento são apresentados pelas Figuras 3, 4 e 5. Para remoção de turbidez, temos a Figura 3 subdividida em tratamento com PAC (a) e cloreto férrico (b). O mesmo ocorre nas Figuras 4 e 5, para remoção de cor aparente e DQO, respectivamente.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

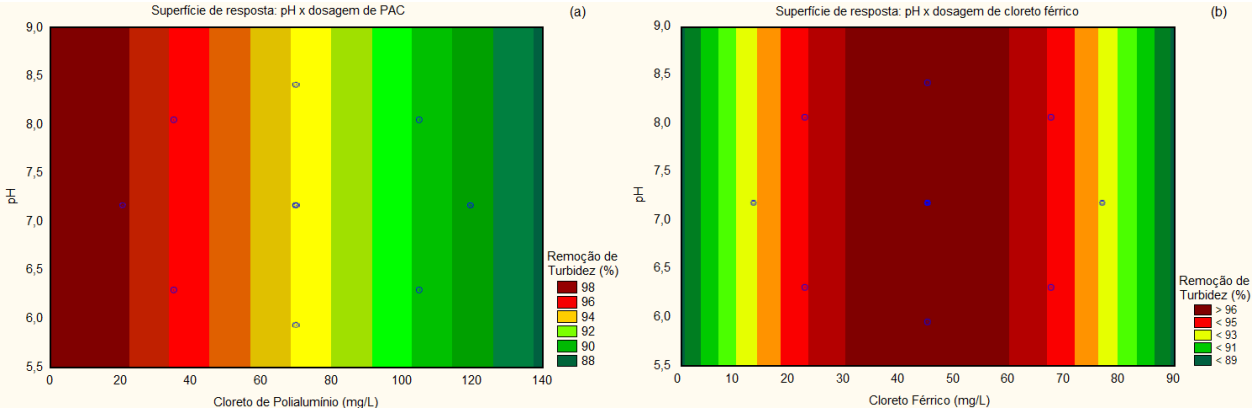

Figura 3. Gráfico de resposta com melhores parâmetros para a eficiência na remoção de turbidez com (a) PAC e (b) cloreto férrico

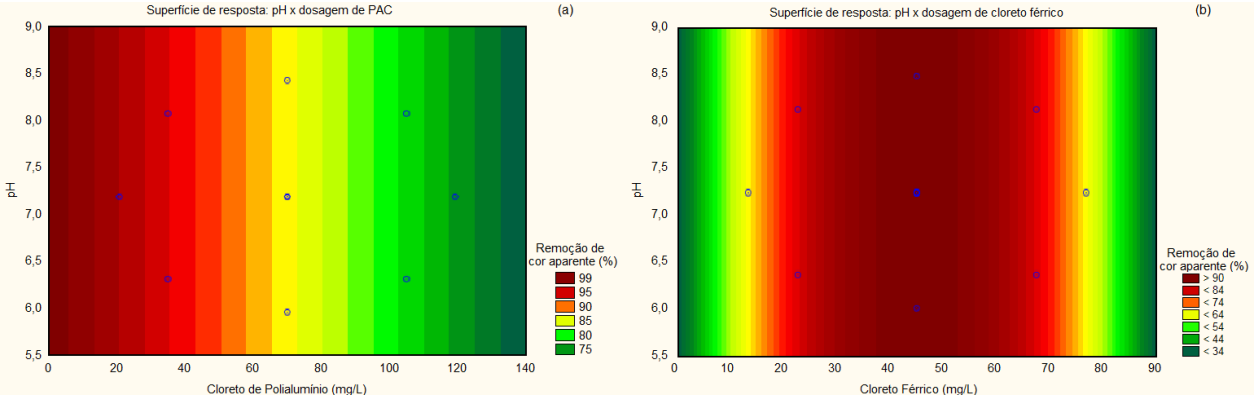

Figura 4. Gráfico de resposta com melhores parâmetros para a eficiência na remoção de cor aparente com (a) PAC e (b) cloreto férrico.

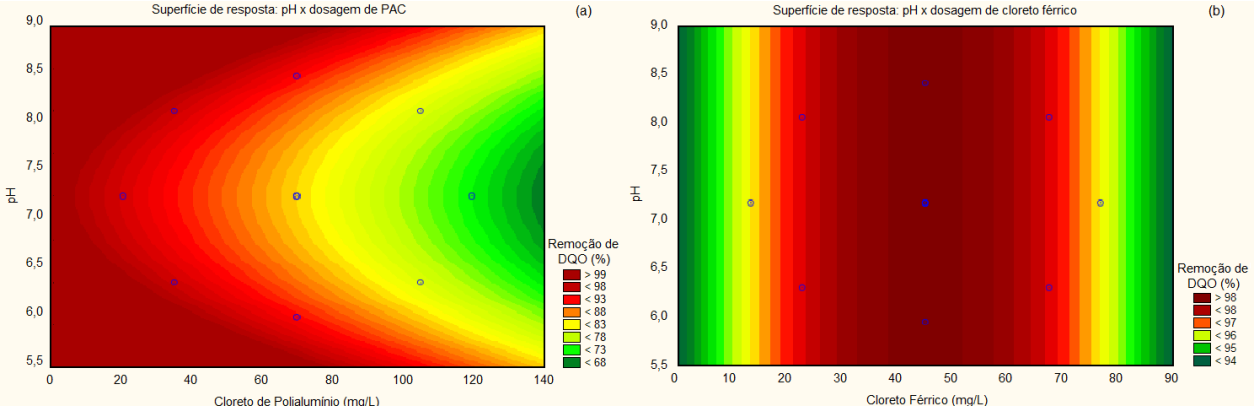

Figura 5. Gráfico de resposta com melhores parâmetros para a eficiência na remoção de DQO com (a) PAC e (b) cloreto férrico.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

Apesar de atingir índices de remoção de turbidez próximos a apenas 80%, Choy *et al.* (2016) apresentam que a aplicação de amido de arroz autoclavado combinado com a utilização do coagulante PAC se mostra como uma opção interessante a ser analisada, já que com isso possibilita-se a redução da dosagem do coagulante químico, com a consequente redução de lodo gerada no processo em 60%.

Tratamento utilizando o coagulante cloreto férrico

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos ao tratar o efluente com o coagulante cloreto férrico. Como já era esperado, o cloreto férrico acaba influenciando negativamente na remoção de cor aparente, devido as propriedades do ferro, fato semelhante ao relatado por Irfan *et al*. (2017). Sendo assim, a utilização deste coagulante é por vezes evitada, pois a remoção de cor é inferior à obtida pelo tratamento com outros coagulantes.

Tabela 6. Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e DQO utilizando o cloreto férrico, com variações entre as dosagens de coagulante e o pH de coagulação.

Parâmetro	Ensaios realizados e resultados obtidos								
Dosagem de coagulante (mg/L)	6.03	18.08	18.08	42.18	42.18	42.18	66.28	66.28	78.33
pH corrigido para coagulação	7.14	6.19	8.09	5.80	7.14	8.48	6.19	8.09	7.14
Remoção de turbidez (%)	86.55	97.80	97.07	94.88	96.08	98.05	95.12	96.34	95.70
Remoção de cor aparente (%)	68.80	97.88	89.29	91.41	95.57	97.98	89.80	77.07	47.52
Remoção de DQO (%)	95.96	97.34	98.45	98.19	98.24	98.79	98.19	98.45	95.23

Para o tratamento com cloreto férrico, Daud *et al*. (2015) utilizaram dosagem de 350 mg/L, atingindo remoção de 93% de cor e 63% de DQO, sendo que a inserção de coagulante superior a quantidade ótima pode reduzir a eficiência do tratamento. Já Bouranene *et al*. (2015) conseguiram uma remoção de turbidez superior a 99% em um efluente de pintura industrial.

Irfan *et al.* (2017) mostram que apesar da remoção baixa de DQO (16%), a remoção com cloreto férrico foi superior a atingida pelos tratamento com o coagulante PAC. Entretanto, a remoção de cor chegou a apenas 46%.

Resultados do tratamento com tanino no ponto ótimo de trabalho

Através dos resultados apresentados pelas Tabelas 4, 5 e 6, bem como Figuras 1-5, verifica-se que o tanino foi o coagulante que apresentou os melhores resultados de tratamento. Dessa maneira, considerando-se como parâmetro de resposta a remoção de cor, DQO e turbidez, com o auxílio da ferramenta *desirability* do *Statistica* verifica-se que o ponto ótimo de trabalho foi obtido ao utilizar pH de coagulação de 7.14 e dosagem de coagulante tanino de 80 mg/L.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

Para a realização dos ensaios no ponto ótimo de trabalho, realizou-se uma nova coleta de efluente, o qual tem as características apresentadas pela Tabela 7.

Tabela 7. Características do efluente bruto utilizado no ponto ótimo de tratamento com tanino.

Parâmetros	Resultado
Cor aparente (uH)	2463
Turbidez (UNT)	1075
pH	7.14
DQO (mg O_2/L)	3603
Condutividade elétrica (µS/cm)	484
ST (mg/L)	3393
STV (mg/L)	2951
STF (mg/L)	542
SST (mg/L)	3228
SSV (mg/L)	2875
SSF (mg/L)	253
Fósforo total (mg P-PO_4/L)	0.94
NKT (mg N-NKT/L)	37.07
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	232.60

Verifica-se através da Tabela 7 que o efluente da segunda coleta apresentava maiores índices de turbidez, cor aparente e DQO do que o efluente da primeira coleta, o que pode ser explicado pela lavagem de lotes de plásticos mais poluídos ou pela utilização desse efluente por maiores períodos de tempo no processo de tratamento.

Para o tratamento com o coagulante tanino no ponto ótimo, observamos resultados a seguir: turbidez residual de 15.7 UNT (remoção de 98.54%), cor residual de 28 uH (remoção de 98.86%) e DQO residual de 122.29 mg O_2/L (remoção de 96.61%). O pH teve uma variação de pouca significância (6.85 após o tratamento, variando 4.06%), enquanto a condutividade chegou a 517.6 µS/cm (6.94% de aumento). O lodo final do processo correspondia a 20% da quantidade de efluente tratado, medidos diretamente no jarro do equipamento jar-test. A alcalinidade manteve-se próxima a encontrada no efluente bruto (redução de 8.85%), enquanto as remoções de nitrogênio e fósforo atingiram 25.22% e 74.57%, respectivamente. A remoção de sólidos também se mostrou satisfatória, com 91.72, 97.35, 52.94, 99.21, 99.11 e 100% para ST, STV, STF, SST, SSV e SSF.

Kuo Huang *et al.* (2019) também apresentaram um aumento de condutividade (cerca de 18.46%) após o tratamento com os processos de coagulação, floculação e sedimentação. Também diverge do presente trabalho a variação do pH após o tratamento, já que tais autores tiveram uma

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

redução desse parâmetro de 10.8 para 7.6, ou seja, 29.63%. Já Couto Junior *et al.* (2013) chegaram a uma redução de pH mais contida (variação de 8.34%, média de pH reduziu de 7.35 para 6.73).

Para a remoção de SST, verifica-se que o presente trabalho apresenta resultados condizentes com os encontrados na literatura, visto que o tratamento realizado por Hameed *et al.* (2016) chegou a remoção média de 64%, com resultados individuais superiores a 80%. O mesmo ocorre ao verificar a remoção de ST obtida por Dela Justina *et al.* (2018), que atingiu 13,6% na dosagem ótima de coagulante. Beltrán-Heredia e Sánchez-Martín (2009) verificaram a remoção de até 75% de SST, desde que a dosagem de coagulante utilizada seja baixa (cerca de 60 ppm).

Zaneti *et al.* (2013) realizaram o tratamento do efluente de uma empresa de lavagem veicular, visando seu reúso, e através dos processos de flotação em coluna de floculação, filtragem e cloração, e conseguiram a remoção de 91% para turbidez, 63% para DQO e 91% para SST, mas tiveram acréscimos de 12% nos SDT e de 22% em relação à condutividade.

Lopes *et al.* (2019) observam que tanto o tanino, quanto o sulfato de ferro podem remover totalmente a cor de um efluente sintético, que simula as propriedades de um efluente têxtil, ao serem combinados com o floculante Magnafloc 155. Para este tipo de efluente, o coagulante natural mostrou-se satisfatório em uma ampla faixa de pH (entre 4 e 9), enquanto o inorgânico se mostrou mais eficiente em condições ácidas. A turbidez residual destes autores ficou abaixo de 20 UNT para ambos coagulantes, seguindo a melhor faixa de pH encontrada para a eficiência na remoção de cor.

Através da combinação de taninos com aminas, Arismendi *et al.* (2018) realizaram o tratamento em três efluentes diferentes. Para águas residuais de maquinas de lavar, chegaram as remoções de 95%, 76%, 66%, 69% para turbidez, cor, DQO e ST, respectivamente, além de um pequeno acréscimo (5%) na quantidade de fósforo. No efluente de um rio da Colômbia, as remoções foram de 99%, 90%, 72%, 95% e 52% (turbidez, cor, DQO, ST e fósforo). Já para o efluente que simulava águas tóxicas, com corantes diazo, chegaram a reduções de 99%, 96%, 70%, 96% e 14%, considerando os mesmos parâmetros.

Ferrari-Lima *et al*. (2013) estudaram o tratamento de águas residuais de um posto de combustível, onde pela etapa de coagulação e floculação observaram a remoção de 73% da DQO, 90% de turbidez e 51% dos ST.

Limites para o lançamento e reúso de efluentes

Para o lançamento de efluentes na região do presente estudo, devem-se atender os limites estaduais, descritos nas Resoluções CEMA 70 (Brasil, 2009a) e SEMA 21 (Brasil, 2009b), e federais, representadas pelas Resoluções CONAMA 357 (Brasil, 2005) e 430 (Brasil, 2011), tendo posse das devidas licenças

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

(prévia, de instalação, operação e ambiental). Verifica-se que o efluente tratado no presente trabalho atende até mesmo a requisitos para caracterização como água doce de classe 1, onde há pesca ou cultivo de organismos consumíveis, como turbidez inferior a 100 UNT, cor até 75 uH e pH entre 5 e 9. Também se verifica o atendimento para o parâmetro de DQO máximo estadual de lançamento direto ou indireto em corpos de água (até 225 mg O_2/L). Existem ainda outros limites a serem atendidos, mas que dependem do tipo de água do leito receptor do efluente tratado, podendo ser água doce, salina ou salobra. Dessa maneira, o tratamento mostra resultados promissores e que atendem com folgas as regulamentações necessárias para descarte e lançamentos.

Para a aplicação das técnicas de reúso de água, verifica-se que não existem regulamentações específicas do efluente proveniente de lavagem em indústrias de reciclagem de plástico. Utilizando-se como base os padrões exigidos para usos em construção civil indicados pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2005), onde não há contato direto com usuários, verifica-se que não são apresentados limites de cor, DQO e turbidez. Dessa maneira, como o processo de lavagem de plástico é realizado por maquinas e não exige água de qualidade, o processo de reúso mostra-se viável e vantajoso, visto que pode reduzir gastos com água/esgoto e ser mais amigável ao meio ambiente (Bordonalli e Mendes, 2009).

Conclusões

Baseando-se nos resultados apresentados, podemos realizar algumas considerações:

- Trata-se de um efluente que pode ser tratado com facilidade, já que todos coagulantes chegaram a resultados satisfatórios de tratamento em seus pontos ótimos;
- Considerando-se os pontos centrais de trabalho, observamos que o cloreto férrico necessita menores dosagens de coagulante, enquanto o tanino exige a maior dosagem;
- Nem sempre aumentar a dosagem de coagulante levará a resultados superiores, já que sobredoses de coagulante podem piorar os índices de tratamento;
- Mostra-se de extrema importância a realização de pré-testes para determinação das regiões e métodos de trabalho, já que cada efluente e coagulante se comporta de maneira diferente.
- O coagulante tanino se mostrou uma excelente opção para substituir os coagulantes inorgânicos convencionais, já que facilita o descarte do lodo por ser biodegradável e apresentou resultados de tratamento superiores ao cloreto férrico ou PAC, confirmando as tendências atuais de buscar a utilização de coagulantes naturais.

Referencias bibliográficas

ANA, Agência Nacional de Águas (2005) Conservação e Reúso de água em Edificações. São Paulo: Prol Editora Gráfica. 151 pp. Acesso em 10 de maio de 2019, disponível em: http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/conservacao-e-reuso-de-aguas-em-edificacoes-2005/.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

APHA, American Public Health Association (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22th ed. Washington, DC, USA.

Arismendi, W. A., Ortiz-Ardila, A. E., Delgado, C. V., Lugo, L., Sequeda-Castañeda, L. G., Celis-Zambrano, C. A. (2018) Modified tannins and their application in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, **78**(5), 1115–1128. https://doi.org/10.2166/wst.2018.336.

Beltran-Heredia, J., Sanchez-Martín, J. (2009) Municipal wastewater treatment by modified tannin flocculant agent. *Desalination.* **249**(1), 353–358. https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.039.

Bordonalli, A. C. O., Mendes, C. G. da N. (2009) Reúso de água em indústria de reciclagem de plástico tipo PEAD. Engenharia Sanitaria e Ambiental, **14**(2), 235–244. https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000200011.

Bouranene, S., Sedira, N., Fievet, P., Attia, N. (2015). Treatment of paint wastewater by coagulation process. *Filtration + Separation*, **52**(4), 42–45. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(15)30184-1.

Brasil (2005) *Resolução Nº 357: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões delançamento de efluentes, e dá outras providências*. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 27 pp. Acesso em 07 de abril de 2021, disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459.

Brasil (2009a) *Resolução Nº 70/2009 - CEMA. Dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições e critérios e dá outras providências, para Empreendimentos Industriais.* Conselho Estadual do Meio Ambiente (CEMA) 15 pp. Acesso em 07 de abril de 2021, disponível em: https://www.ambienteduran.eng.br/publicador/LEGISLACAO/ESTADUAL/resolucao_cema_70_2009.pdf.

Brasil (2009b) *Resolução nº 021 - SEMA. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento*. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Acesso em 07 de abril de 2021, disponível em: http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-11/resolucao_sema_21_2009_licenciamento_padroes_ambientais_saneamento.pdf.

Brasil (2011) *Resolução Nº 430: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA*. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 9 p. Acesso em 07 de abril de 2021, disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646.

Couto Junior, O. M., Barros, M. A. S. D., Pereira, N. C. (2013) Study on coagulation and flocculation for treating effluents of textile industry. *Acta Scientiarum. Technology*, **35**(1). 83–88. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v35i1.11685.

Daud, N. M., Sheikh Abdullah, S. R., Abu Hasan, H., Yaakob, Z. (2015) Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, **94**, 487–508. https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.10.009.

Dela Justina, M., Rodrigues Bagnolin Muniz, B., Mattge Bröring, M., Costa, V. J., Skoronski, E. (2018) Using vegetable tannin and polyaluminium chloride as coagulants for dairy wastewater treatment: A comparative study. *Journal of Water Process Engineering*, **25**, 173–181. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.001.

Dotto, J., Fagundes-Klen, M. R., Veit, M. T., Palácio, S. M., Bergamasco, R. (2018) Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. *Journal of Cleaner Production*, **208**, 656–665. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.112.

Ferrari-Lima, A. M., Marques, R. G., Fernandes-Machado, N. R. C., Gimenes, M. L. (2013) Photodegradation of petrol station wastewater after coagulation/flocculation with tannin-based coagulant. *Catalysis Today*, **209**, 79–83. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.10.022.

Hameed, Y. T., Idris, A., Hussain, S. A., Abdullah, N. (2016) A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater: Chemical composition, performance assessment compared to Polyaluminum chloride, and application in a pilot plant. *Journal of Environmental Management*, **184**(3), 494–503. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.033.

Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica. ISSN 0718-378X
http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.79237
Vol. 15, No.2, 685-700
6 de agosto de 2022

Irfan, M., Butt, T., Imtiaz, N., Abbas, N., Khan, R. A., Shafique, A. (2017) The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate. *Arabian Journal of Chemistry*, **10**(2), S2307–S2318. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.007.

Kuo Huang, A., Veit, M. T., Trevisani Juchen, P., da Cunha Gonçalves, G., Moreno Palácio, S., de Oliveira Cardoso, C. (2019). Sequential process of coagulation/flocculation/sedimentation- adsorption - microfiltration for laundry effluent treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **7**(4), 103226. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103226.

Lopes, E. C., Santos, S. C. R., Pintor, A. M. A., Boaventura, R. A. R., Botelho, C. M. S. (2019) Evaluation of a tannin-based coagulant on the decolorization of synthetic effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103125. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103125.

Plastics Europe (2018). *Plastics – the facts 2017*. 44 p. Acesso em 07 de abril de 2021, disponível em: https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf.

Saleem, M., Bachmann, R. T. (2018) A Contemporary Review on Plant-Based Coagulants for Applications in Water Treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **72**(25), 281–297. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.12.029.

Salgot, M., Folch, M. (2018) Wastewater treatment and water reuse. Current Opinion in *Environmental Science & Health*, **2**, 64–74. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005.

Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., Solera-Hernández, C. (2010). Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. *Journal of Environmental Management*, **91**(10), 2051–2058. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.013.

Sánchez-Martín, J., González-Velasco, M., Beltrán-Heredia, J. (2010) Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (Schinopsis balansae). *Chemical Engineering Journal*, **165**(3), 851–858. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.10.030.

Zaneti, R. N., Etchepare, R., Rubio, J. (2013) Car wash wastewater treatment and water reuse – a case study. *Water Science and Technology*, **67**(1), 82–88. https://doi.org/10.2166/wst.2012.492