

II-658 – EXTRAÇÃO E APLICAÇÃO DA PECTINA DO ALBEDO DE MARACUJÁ PARA TRATAMENTO DE MATRIZES TÊXTEIS

Alex Leandro Andrade de Lucena⁽¹⁾

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2015), Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (2018) e Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (2022), na área de engenharia ambiental com tratamento de poluentes orgânicos persistentes via POA. Atualmente encontra-se como bolsista de fixação a pesquisa (pós-doutorado) na Universidade Federal de Pernambuco.

Maria Júlia de Oliveria Rocha⁽²⁾

Bacharel em Química Industrial pela Universidade Federal de Pernambuco (2023).

Rayany Magali da Rocha Santana⁽³⁾

Engenheira Química pelo Centro Universitário Maurício de Nassau (2017). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (2020). Doutora em Engenharia Química, também pela Universidade Federal de Pernambuco (2024). Possui experiência na área química, com ênfase em cromatografia líquida, validação de metodologia, análise físico-química de efluentes, tratamento de efluentes através de processos oxidativos avançados, bem como produção de biopolímeros.

Marta Maria Menezes Bezerra Duarte⁽⁴⁾

Possui graduação em Química Industrial pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) (1991), Mestrado (1996) e Doutorado (2001) em Química pelo Departamento de Química Fundamental da UFPE. Trabalhou no Instituto de Tecnologia de Pernambuco/ITEP de 1998 a agosto de 2007. Atualmente é Professora do magistério superior do Departamento de Engenharia Química (DEQ) e membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFPE

Daniella Carla Napoleão⁽⁵⁾

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (2008), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (2011) e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (2015). Atualmente é professora Adjunta C II da Universidade Federal de Pernambuco e membra permanente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Tratamento de Efluentes e Processos Oxidativos Avançados.

Endereço⁽¹⁾: Rua Major João Ribeiro Pinheiro, 245 - Várzea - Recife - Pernambuco - CEP: 50740-170 - Brasil - Tel: +55 (84) 9-9926-4909 - e-mail: lucenaalex3@gmail.com

RESUMO

Este trabalho investigou a possibilidade de uso da pectina do albedo de maracujá em conjunto com o sulfato de alumínio para o tratamento de matrizes têxteis, de forma a substituir os coagulantes químicos normalmente utilizados nos processos de coagulação e floculação, que podem gerar contaminação quando liberados no meio ambiente. Bem como avaliar as variáveis do método convencional de extração de pectina a fim de obter maiores rendimentos. Para a extração, foi realizado um planejamento fatorial 2^3 com triplicata do ponto central, no qual foram estudadas as variáveis: agitação, temperatura e tempo. Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados com auxílio de *jar test*, sendo avaliados através de um planejamento fatorial 2^4 com três réplicas do ponto central, cujos fatores foram: concentração de sulfato de alumínio, concentração de pectina, tempo de mistura lenta e pH. Por meio dos dados fornecidos pelo *software Statistica 12.0*, pode-se afirmar que as três variáveis da extração estudadas são significativas e atuam de forma independente. As condições que conduziram ao maior rendimento (23,67%) foram 180 rpm de agitação, 80°C e 120 min. Os ensaios preliminares de coagulação/ floculação evidenciaram que o uso da pectina proporcionou mais que o dobro de eficiência, aumentando de 36,95 para 86,26%. Pode-se concluir que a pectina é eficaz atuando apenas como floculante, pois, quando utilizada sozinha, promoveu apenas 1,33% de remoção de corante. O planejamento experimental empregado para avaliar a coagulação/floculação, identificou que os fatores concentração de sulfato de alumínio, concentração de pectina, pH e a interação entre concentração de $Al_2(SO_4)_3$ e pH são significativos.

PALAVRAS-CHAVE: Coagulação; Floculação; Pectina; Sulfato de Alumínio

INTRODUÇÃO

Água potável é um bem fundamental a vida humana e animal. A industrial têxtil é um dos setores que mais ameaça a disponibilidade deste recurso, em especial graças ao alto volume de efluentes gerados nos processos produtivos, além da multiplicidade de componentes presentes nestes. Esta característica torna o tratamento destes efluentes um trabalho delicado, em especial em se tratando da presença dos corantes (MADHAV *et al.*, 2018; WANG; JIANG; GAO, 2022).

Os corantes têxteis são compostos altamente solúveis, com alta capacidade de infiltração no meio ambiente e tóxicos, cuja liberação na natureza pode afetar gravemente fauna e flora (YUSUFF; OBENDE; EGBOSIUDA, 2024). De forma a mitigar os impactos causados pelo lançamento de efluentes têxteis brutos no meio ambiente, estes são submetidos a uma série de tratamentos físico-químicos e biológicos antes da liberação, como a combinação de coagulação seguida da floculação (HOLKAR *et al.*, 2016; RAMOS *et al.*, 2021; GARVASIS *et al.*, 2020).

O processo de coagulação se baseia na adição de produtos químicos, geralmente sais inorgânicos, para desestabilização das suspensões coloidais, sendo os sais mais utilizados o sulfato de alumínio, o sulfato férrico e o cloreto férrico. Estes, apesar da eficácia, apresentam desvantagens em especial danos aos ecossistemas locais e à saúde humana quando em contato com os mesmos (RAMOS *et al.*, 2021; GARVASIS *et al.*, 2020).

A presença de sais de alumínio em água tratada, por exemplo, pode favorecer o surgimento de doenças como o mal de Alzheimer, perda de energia, constipação intestinal e cólicas. E os sedimentos formados após a coagulação são geralmente tóxicos, precisando de tratamento antes da disposição final (OWODUNNI; ISMAIL, 2021).

Diante disto, fica notória a necessidade de encontrar substitutos para os coagulantes químicos. Uma das alternativas estudadas é a combinação ou substituição com coagulantes naturais e biodegradáveis. Materiais que diminuam a quantidade de lodo formada, o custo dos tratamentos, não apresentem toxicidade e sejam de acesso fácil na natureza, como a pectina (OWODUNNI; ISMAIL, 2021).

A pectina é um polímero natural, biodegradável, que pode ser extraído de plantas. Ela apresenta-se como uma opção de coagulante natural, tendo em vista que à presença de grupos carboxila e hidroxila na mesma a tornam atrativa para os contaminantes. Além disso, apresenta-se de forma abundante na natureza e com baixo custo (MARTÍNEZ-SABANDO *et al.*, 2023).

OBJETIVO

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso da pectina atrelada ao sulfato de alumínio para remoção de corantes têxteis, além da otimização dos parâmetros de aplicação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pectina foi obtida a partir de cascas de maracujá lavadas com água corrente e separados o mesocarpo (Albedo) e o epicarpo. O albedo foi cortado e inserido em recipientes de vidro, sendo submetidos a secagem a 60 °C sob agitação num agitador orbital *Shaker* (SP Labor). O material já seco foi triturado em liquificador e peneirado a 170 mesh.

3 g de amostra foram então pesadas e adicionadas a 150 mL de solução de ácido cítrico a 1% num Erlenmeyer. De forma a se identificar as melhores condições operacionais para realização da extração da pectina do albedo de maracujá foi realizado um planejamento fatorial 23 com ponto central em triplicata para a solução preparada (Tabela 2).

Ao final dos ensaios descritos na Tabela 2, as soluções foram filtradas em tecido de nylon. Em seguida, transferiu-se o filtrado para um béquer, ao qual foi adicionado álcool hidratado 92,8° INPM na proporção de 1:1. A mistura foi homogeneizada e armazenada em geladeira a 4 °C por 20 h. Após este período foram realizadas 3 lavagens com

álcool hidratado 92,8° INPM. A pectina retida no tecido foi secada a 50 °C sob agitação e pesada, com o rendimento sendo calculado conforme Equação 1.

$$R (\%) = (\text{massa final de pectina/massa inicial de albedo}) \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Os testes de coagulação/floculação foram realizados em equipamento Jar Test (Quimis). Sendo utilizadas soluções aquosas de 400 mL contendo uma mistura com 4 corantes têxteis a 15 mg.L⁻¹ cada: vermelho direto 227, vermelho direto 23, azul reativo 21 e preto direto 22. Além da pectina foram utilizados o auxiliar óxido de cálcio (CaO) e o coagulante sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃), adicionados nesta ordem.

Em seguida foi realizada uma etapa de mistura rápida com agitação de 120 rpm por 2 min, conforme trabalho realizado por Silva *et al.* (2019). Após este período adicionou-se a pectina, dando início a floculação, com agitação fixada a 40 rpm com base no estudo realizado por Kebaili *et al.* (2018).

As massas de pectina e sulfato de alumínio adicionados, assim como o tempo de mistura lenta e pH da solução foram determinados com base em planejamento fatorial 2⁴ (Tabela 1), com ponto de central em triplicata, e a resposta sendo o percentual de remoção de cor.

Tabela 1 - Resultados do planejamento experimental de coagulação/floculação.

| Experimento | Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg·L ⁻¹) | Pectina (mg·L ⁻¹) | Tempo de mistura lenta (min) | pH |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----|
| 1 | 150 | 50 | 15 | 3 |
| 2 | 450 | 50 | 15 | 3 |
| 3 | 150 | 100 | 15 | 3 |
| 4 | 450 | 100 | 15 | 3 |
| 5 | 150 | 50 | 45 | 3 |
| 6 | 450 | 50 | 45 | 3 |
| 7 | 150 | 100 | 45 | 3 |
| 8 | 450 | 100 | 45 | 3 |
| 9 | 150 | 50 | 15 | 9 |
| 10 | 450 | 50 | 15 | 9 |
| 11 | 150 | 100 | 15 | 9 |
| 12 | 450 | 100 | 15 | 9 |
| 13 | 150 | 50 | 45 | 9 |
| 14 | 450 | 50 | 45 | 9 |
| 15 | 150 | 100 | 45 | 9 |
| 16 | 450 | 100 | 45 | 9 |
| 17 | 300 | 75 | 30 | 6 |

| | | | | |
|----|-----|----|----|---|
| 18 | 300 | 75 | 30 | 6 |
| 19 | 300 | 75 | 30 | 6 |

RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Os resultados para os experimentos de rendimento da extração da pectina estão expostos da Tabela 2.

Tabela 2: Resultados do Planejamento experimental da extração de pectina.

| Experimento | Agitação (rpm) | Temperatura (°C) | Tempo (min) | Rendimento (%) |
|-------------|----------------|------------------|-------------|----------------|
| 1 | 100 | 40 | 60 | 15,08 |
| 2 | 180 | 40 | 60 | 17,62 |
| 3 | 100 | 80 | 60 | 20,17 |
| 4 | 180 | 80 | 60 | 22,31 |
| 5 | 100 | 40 | 120 | 17,93 |
| 6 | 180 | 40 | 120 | 19,04 |
| 7 | 100 | 80 | 120 | 22,83 |
| 8 | 180 | 80 | 120 | 23,67 |
| 9 | 140 | 60 | 90 | 20,27 |
| 10 | 140 | 60 | 90 | 19,33 |
| 11 | 140 | 60 | 90 | 19,47 |

Com os dados da Tabela 2, foi possível obter, com auxílio do *Software Statistica 12.0*, o gráfico de Pareto (Figura 1).

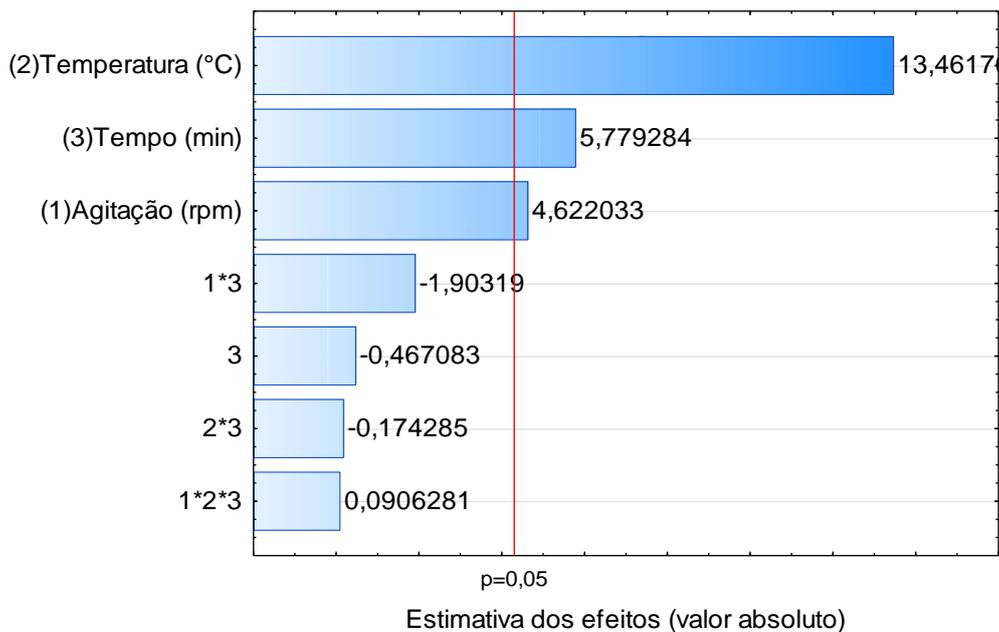


Figura 1: Gráfico de Pareto da extração.

Da Figura 1 percebe-se que os efeitos principais avaliados são os únicos significativos de forma independente. Com a temperatura exercendo a maior influência na resposta. Em seguida foi utilizada a metodologia da superfície de resposta para realizar a extração nas melhores condições possíveis, conforme Figura 2.

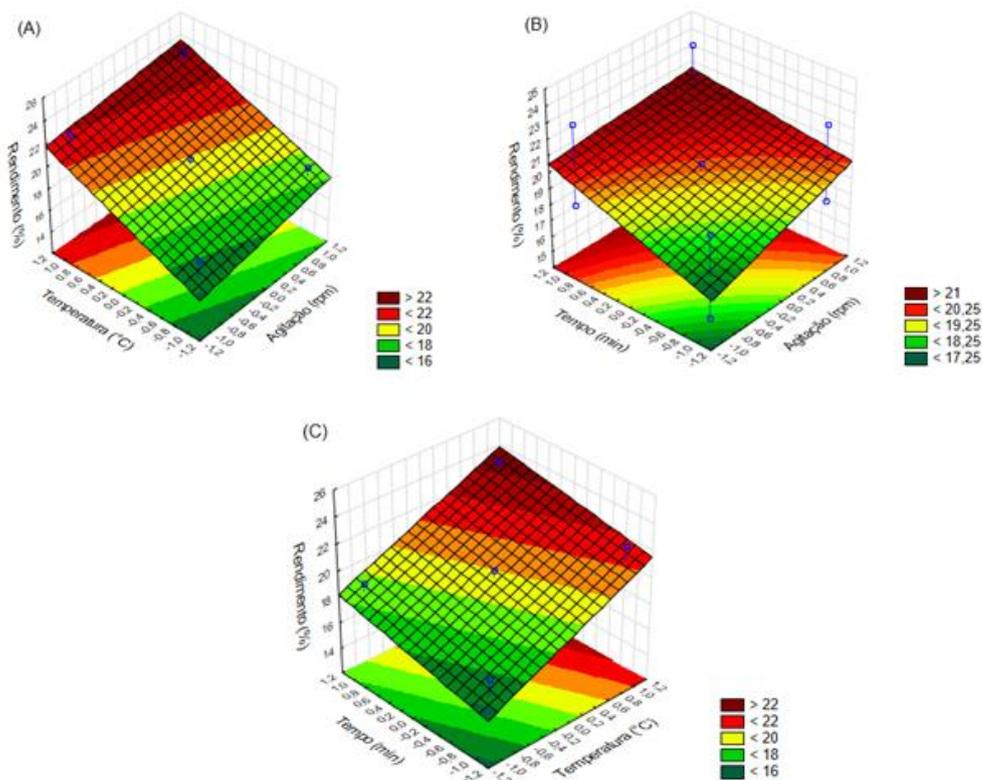


Figura 2: Superfícies de resposta para as variáveis: (A) temperatura e agitação; (B) tempo e agitação; (C) tempo e temperatura.

A partir da Figura 2, constatou-se que os maiores níveis das três variáveis levaram a maiores rendimentos. Desta forma, foi determinada que a extração da pectina seria realizada a 180 rpm de agitação e temperatura de 80°C durante 2 h, uma vez que estes valores correspondem aos níveis mais altos dos fatores.

De forma a investigar o efeito da pectina como coagulante ou floculante, foi realizado um planejamento fatorial 24 conforme Tabela 3.

Tabela 3: Resultados do planejamento experimental de coagulação/floculação

| Experimento | Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg·L ⁻¹) | Pectina (mg·L ⁻¹) | Tempo de mistura lenta (min) | pH | Remoção (%) |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----|-------------|
| 1 | 150 | 50 | 15 | 3 | 33,40 |
| 2 | 450 | 50 | 15 | 3 | 38,44 |
| 3 | 150 | 100 | 15 | 3 | 29,93 |
| 4 | 450 | 100 | 15 | 3 | 34,19 |
| 5 | 150 | 50 | 45 | 3 | 32,12 |
| 6 | 450 | 50 | 45 | 3 | 41,46 |
| 7 | 150 | 100 | 45 | 3 | 27,17 |
| 8 | 450 | 100 | 45 | 3 | 37,96 |
| 9 | 150 | 50 | 15 | 9 | 22,79 |
| 10 | 450 | 50 | 15 | 9 | 69,66 |
| 11 | 150 | 100 | 15 | 9 | 22,85 |
| 12 | 450 | 100 | 15 | 9 | 64,34 |
| 13 | 150 | 50 | 45 | 9 | 23,77 |
| 14 | 450 | 50 | 45 | 9 | 67,24 |
| 15 | 150 | 100 | 45 | 9 | 22,66 |
| 16 | 450 | 100 | 45 | 9 | 65,35 |
| 17 | 300 | 75 | 30 | 6 | 52,91 |
| 18 | 300 | 75 | 30 | 6 | 52,59 |
| 19 | 300 | 75 | 30 | 6 | 51,49 |

A partir da Tabela 3 foi obtido o gráfico de Pareto conforme Figura 3.

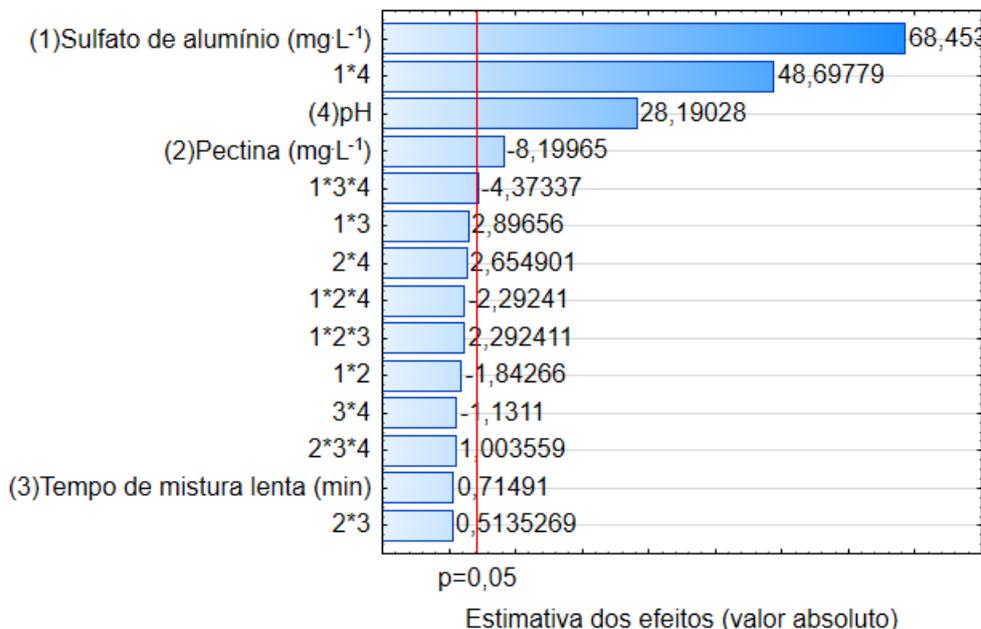


Figura 3: Gráfico de Pareto da coagulação/floculação.

Da Figura 3 nota-se que os fatores de concentração de pectina, pH, concentração de sulfato de alumínio e a interação entre pH e sulfato de alumínio são significativos.

Por fim, o planejamento fatorial presente na Tabela 3 foi ampliado para um planejamento em estrela que permitiu notar os maiores graus de remoção da cor foram obtidos ao se utilizar uma concentração de Al₂(SO₄)₃ de 500 mg.L⁻¹, pectina a 75 mg.L⁻¹, um tempo de mistura lenta de 30 min e pH 6, com a remoção atingindo 86,26%.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados obtidos a partir dos ensaios descritos na Tabela 2 foram tratados com auxílio do software *Statistica* 12.0. Além disso, alíquotas das soluções foram retiradas para análise em espectrofotômetro UV-VIS Genesys 10S, realizada no comprimento de onda de 508 nm, no qual o pico de absorção é mais intenso para essa mistura de corantes, conforme Santana *et al.* (2021).

O efeito da temperatura no rendimento de geração da pectina condiz com o esperado, visto que temperaturas maiores favorecem a solubilidade da mesma, além de serem capazes de romper a parede celular, permitindo um melhor rendimento da extração (PICOT-ALLAIN; RAMASAWMY; EMMAMBUX, 2020). Já a agitação pode ser explicada por esta promover um maior contato entre o albedo e o solvente extrator. E uma vez que a transferência de massa ocorre até que o equilíbrio seja alcançado, o tempo tende a melhorar a eficiência da extração, por isso a significância. Porém, após o equilíbrio, tempos maiores promovem a degradação do polissacarídeo, diminuindo a quantidade obtida (Freitas *et al.* 2020). Importante salientar que os níveis das variáveis estudadas foram todos positivos, indicando que o aumento delas leva a maior eficiência.

Os resultados encontrados para a extração da pectina estão de acordo com dados obtidos da literatura. Segundo Kontogiorgos (2020), maiores rendimentos de pectina foram obtidos numa faixa de temperatura entre 70 e 90 °C, com tempos de extração entre 1 e 3h e com rendimento variando entre 8 e 30,0% (PICOT-ALLAIN; RAMASAWMY; EMMAMBUX, 2020; RIPOLL; HINCAPIÉ-LLANOS, 2023).

Os parâmetros significativos conforme Figura 3 (concentração de pectina, pH, concentração de sulfato de alumínio e a interação entre pH e sulfato de alumínio) podem afetar a eficiência de coagulação tendo em vista que a dosagem de coagulante e floculante influencia diretamente na redução da repulsão eletrostática entre as partículas.

Com relação ao efeito do pH, este interfere diretamente no processo de coagulação, especialmente quando o mecanismo é de adsorção e neutralização, como no caso do sulfato de alumínio, o que explica a interação de 2 fatores.

Da Figura 4, nota-se que a concentração de uso de pectina, nos níveis estudados, exerce uma influência negativa na resposta, indicando que concentrações mais baixas desta tendem a ser mais eficientes para a remoção da cor. Isto pode ser explicado pelo fenômeno de reversão das cargas presentes e conseqüentemente uma redução de repulsão nas partículas.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Com relação à extração da pectina, os experimentos foram bem sucedidos, com o planejamento fatorial auxiliando na obtenção dos níveis de utilização dos parâmetros que levaram aos maiores rendimentos.

Os três fatores avaliados (tempo, agitação e temperatura) foram significativos e influenciaram a resposta de forma independente, ou seja, sem interação. Com os níveis mais altos de cada uma das variáveis proporcionando os melhores resultados e escolhidos como padrão para obtenção do polissacarídeo (180 rpm de agitação, 80°C e 120 min).

Os ensaios de floculação/coagulação indicaram que os fatores concentração de sulfato de alumínio, concentração de pectina, pH e interação entre sulfato de alumínio e pH são significativos para o processo, atingindo-se uma remoção da cor de 86,26% com 500 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio, 75 mg.L⁻¹ de pectina, 30 min e pH 6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GARVASIS, J; PRASAD, A. R.; SHAMSHEERA, K. O.; JASEELA, P. K.; JOSEPH, A.; *Efficient removal of Congo red from aqueous solutions using phytogenic aluminum sulfate nano coagulant. Materials Chemistry and Physics*, v. 251, p. 123040, 2020.
2. HOLKAR, C. R.; JADHAV, A. J.; PINJARI, D. V.; MAHAMUNI, N. M.; PANDIT, A. B. *A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. Journal of Environmental Management*, v. 182, p. 351-366, 2016.
3. MADHAV, S.; AHAMAD, A.; SINGH, P.; MISHRA, P. K.. *A review of textile industry: Wet processing, environmental impacts, and effluent treatment methods. Environmental Quality Manage*, v. 27, p. 31-41, 2018.
4. ASD MARTÍNEZ-SABANDO, J; COIN, F.; MELILLO, J. H.; GOYANES, S.; CERVENY, S. *A review of pectin-based material for applications in water treatment. Materials*, v. 16, p. 2207, 2023.
5. OWODUNNI, A. A.; ISMAIL, S. *Revolutionary technique for sustainable plant-based green coagulants in industrial wastewater treatment—A review. Journal of Water Process Engineering*, v. 42, p. 102096, 2021.
6. PICOT-ALLAIN, M. C. N.; RAMASAWMY, B.; EMMAMBUX, M. N. *Extraction, characterisation, and application of pectin from tropical and sub-tropical fruits: a review. Food Reviews International*, v. 38, p. 282-312, 2020.
7. RAMOS, M. D. N.; LIMA, L. P. P.; AQUINO, S. F. de; AGUIAR, A. *A critical analysis of the alternative treatments applied to effluents from Brazilian textile industries. Journal of Water Process Engineering*, v. 43, p. 102273, 2021.
8. SANTANA, R. M. R.; NAPOLEÃO, D. C.; SANTOS JÚNIOR, S. G.; GOMES, R. K. M.; MORAES, N. F. S.; ZAIDAN, L. E. M. C.; ELIHIMAS, D. R. M.; NASCIMENTO, G. E.; DUARTE, M. M. M. B. *Photo-Fenton process under sunlight irradiation for textile wastewater degradation: monitoring of residual hydrogen peroxide by spectrophotometric method and modeling artificial neural network models to predict treatment. Chemical Papers (ONLINE)*, v. 75, p. 1, 2021.



9. WANG, X.; JIANG, J.; GAO, W. *Reviewing textile wastewater produced by industries: characteristics, environmental impacts, and treatment strategies*. **Water Science & Technology**, v. 85, p. 2076–2096, 2022.
10. YUSUFF, A. S.; OBENDE, B. A.; EGBOSIUBA, T. C.; *Photocatalytic decolorization of textile effluente over ZnO nanoparticles immobilized on Eucalyptus bark biochar: Parametric optimization, kinetic and economic analyses*. *Water Resources and Industry*. V. 31, 100245, 2024.