ANÁLISE DA EFICIÊNCIA COM DELINEAMENTO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DE TRATAMENTO POR REAÇÃO ELETROLÍTICA DE ÁGUA DE AÇUDE EUTROFIZADO

Cleyton Oliveira da Silva[(1)]
Engenheiro Civil pela Universidade Estácio de Sá / Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB / Supervisor de Produção de Água da Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE - UNBBA.

Rogério[(2)]
Técnico em Eletromecânica
Graduado em Administração de Empresas
Tecnólogo Gestão Ambiental com Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico
Coordenador de Operação Industrial da Bacia do Banabuiú na Companhia de Água e Esgoto do Ceará – CAGECE – UNBBA.

Davi Fernandes Tomé[(3)]
Engenheiro Ambiental e Sanitarista pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE *Campus* Quixadá / Técnico em Obras e Saneamento da Supervisão de Produção de Água da Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE - UNBBA

Annaulhya Patrícia Silveira Chaves[(4)]
Tecnóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE / Especialista em Meio Ambiente pela Universidade de Sevilha / Especialista em Gestão Pública Municipal pela UNB / Técnica em Meio Ambiente pelo Cepep / Técnica em Administração pela Escola Técnica Silmon / Gerente Regional da Bacia do Banabuiú.

Larissa Barbosa Alves[(5)]
Acadêmica de Engenharia Ambiental e Sanitária pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE *Campus* Quixadá / Estagiária da Supervisão de Produção de Água da Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE - UNBBA.

Endereço(1): Av. Estados Unidos, 1515 – Planalto Universitáro - Quixadá - Ceara - CEP: 63902-055 - Brasil - Tel: +55 (88) 3445-1050 - e-mail: cleyton.silva@cagece.com.br.

RESUMO

A escassez hídrica e a eutrofização no açude Pompeu Sobrinho, em Choró/CE, elevam substancialmente a turbidez e a cor da água bruta, prejudicando o tratamento convencional. Para contornar esse problema, este estudo avalia a tecnologia de eletrocoagulação (EC) em batelada, utilizando eletrodos de alumínio, como uma alternativa viável e eficiente.
A investigação foi delineada através da metodologia estatística de superfície de resposta de Box-Behnken, avaliando três fatores operacionais: tempo de tratamento (5 a 20 minutos), condutividade elétrica (5500 a 7000
µS/cm) e pH inicial (6 a 9). Foram conduzidos 15 ensaios experimentais para determinar as condições ideais de redução dos poluentes.
Os resultados demonstraram que o processo atingiu uma eficiência máxima de redução de turbidez de 96,42%, reduzindo a carga de 23,77 UNT para apenas 0,85 UNT. A melhor redução de cor nas amostras atingiu 60% de eficiência. Estas taxas otimizadas foram obtidas operando o sistema no tempo máximo de 20 minutos e condutividade elétrica de 7000 µS/cm, em pH 7,5.
Conclui-se que a eletrocoagulação é viável e que o tempo de tratamento, aliado a altas condutividades elétricas, é o fator determinante para a desestabilização de coloides e formação de hidróxidos coagulantes.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrocoagulação, Eutrofização, Tratamento de água.

CONTEÚDO DO TRABALHO

INTRODUÇÃO

A escassez hídrica é um desafio intensificado pelas mudanças climáticas e afeta especialmente o Nordeste brasileiro, onde secas prolongadas são frequentes. Para combater esse problema, a açudagem tem sido amplamente utilizada na região (Neto, 2017; Ammar et al., 2017; Cavalcante et al., 2023). No entanto, esses reservatórios, a exemplo do açude Pompeu Sobrinho no município de Choró/CE, frequentemente passam por processos severos de eutrofização, elevando significativamente parâmetros como a turbidez e a cor da água bruta de modo que em níveis tão críticos decorrentes da eutrofização, esses parâmetros não são eficientemente tratados por uma ETA convencional sem comprometer a operação ou elevar os custos químicos (Cirilo, 2008).

Diante disso, a eletrocoagulação (EC) tem ganhado destaque como um método inovador e eficaz para o tratamento de águas com elevada carga de poluição e eutrofização (Mao, 2023). A EC baseia-se na dissolução de cátions a partir de ânodos metálicos sacrificiais sob aplicação de corrente elétrica, atuando como coagulantes in situ. A otimização de processos eletroquímicos complexos pode ser feita com excelência utilizando a metodologia de superfície de resposta, destacando-se o delineamento de Box-Behnken. Esta metodologia permite investigar interações entre múltiplos fatores com um número consideravelmente menor de ensaios e em condições extremas, sendo ideal para maximizar ou minimizar as respostas do processo, modelando o cenário ideal de eficiência.

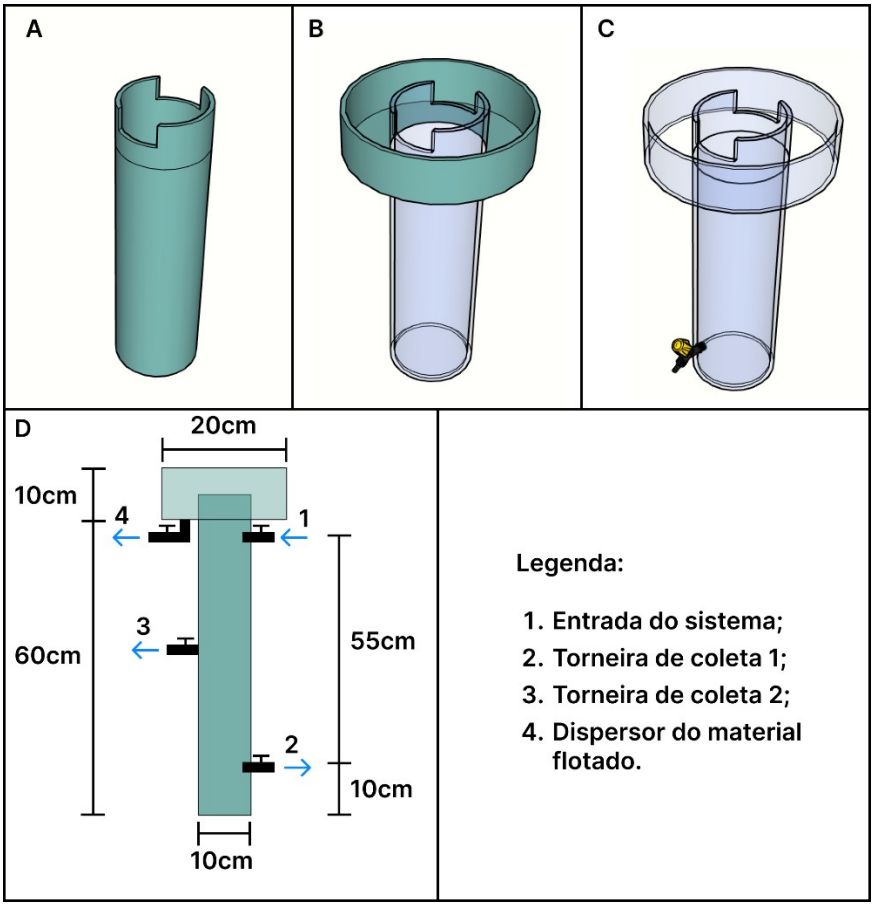
OBJETIVO

Avaliar a eficiência da tecnologia de eletrocoagulação operada em batelada no tratamento de água do açude Pompeu
Sobrinho, utilizando o modelo Box-Behnken para determinar as condições mais viáveis para redução de turbidez e cor.

METODOLOGIA

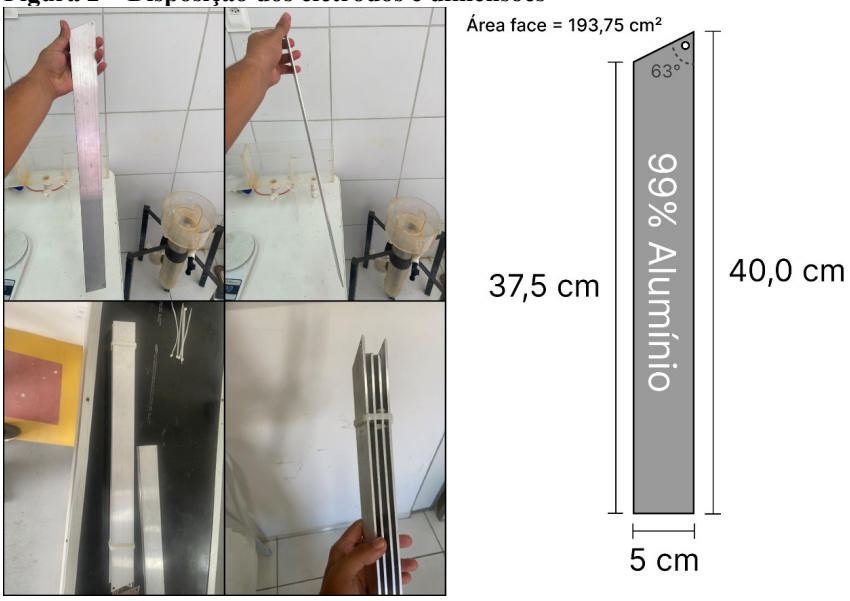
O estudo foi realizado com água bruta coletada da Estação de Tratamento de Água de Choró/CE, captada no açude Pompeu Sobrinho, armazenada para os ensaios de bancada. A etapa em batelada utilizou uma câmara de reações eletrolíticas (CRE) em acrílico com 4,7 litros de volume útil conforme a figura 1. O sistema contou com eletrodos de alumínio (99% de pureza) distribuídos em configuração monopolar paralela com espaçamento de 5 milímetros. Aplicou-se uma fonte com pulso de corrente de 600 Hz (Figura 2). A filtração foi realizada com filtros de papel 102.

Figura 1 – Detalhamento da Câmara de Reações Eletrolíticas



Fonte: Panorama da participação privada no saneamento, 2022 – ABCON/SINDCON.

Figura 2 – Disposição dos eletrodos e dimensões



Fonte: Elaboração própria, 2025.

A estruturação dos experimentos baseou-se no delineamento Box-Behnken abordando três variáveis independentes (fatores): condutividade elétrica (CE) entre 5500 e 7000 µS/cm, tempo de tratamento (TT) entre 5 e 20 minutos, e pH entre 6 e 9. A matriz de planejamento estatístico resultou na condução de 15

rodadas, que incluíram três pontos centrais, utilizando a turbidez como o parâmetro resposta base do modelo de redução.
Os valores iniciais das rodadas foram ajustados por meio da adição de solução de ácido clorídrico ou hidróxido de sódio para o controle de pH, e de cloreto de sódio para adequação da condutividade elétrica.

RESULTADOS
Os ensaios demonstraram variações significativas de eficiência dependendo dos parâmetros adotados. A Tabela 1 ilustra parte dos dados operacionais gerados pela modelagem e suas respectivas eficiências na redução do parâmetro de turbidez.

Tabela 1 - Resultados de redução de turbidez de acordo com os parâmetros iniciais

Rodada	CE	TT	PH da água bruta	Turbidez bruta	Turbidez pós-filtração	Porcentagem de redução
1	5500	12,5	6,0	25,06	3,21	87,19
2	5500	12,5	9,0	26,04	5,44	79,11
3	6250	5,0	6,0	23,93	10,80	54,87
4	5500	5,0	7,5	28,49	12,82	55,00
5	7000	5,0	7,5	27,71	6,64	76,04
6	7000	20,0	7,5	23,77	0,85	96,42
7	6250	12,5	7,5	23,84	4,54	80,96
8	6250	12,5	7,5	23,61	5,58	76,37
9	5500	12,5	9,0	28,91	7,53	73,95
10	7000	12,5	6,0	22,32	4,67	79,08
11	6250	20,0	6,0	22,43	6,45	71,24
12	6250	12,5	7,5	23,16	5,24	77,37
13	6250	20,0	9,0	23,95	8,90	62,84
14	5500	20	7,5	24,66	8,58	65,21
15	6250	5,0	9,0	28,73	7,60	73,55

Fonte: Elaboração própria, 2025.

As rodadas 2, 5, 6 e 10 apresentam os resultados para a condutividade elétrica com valor de 7000 µS/cm. Desses resultados, as rodadas 2 e 10 possuem porcentagem de redução de turbidez – para o tempo de tratamento de 12,5 minutos – com diferença de grau menor, com diferença entre si de 0,03% de redução, tornando o pH, neste caso, um fator menos influente na redução, devido à alta condutividade elétrica. Diferentemente, quando, nessa condutividade elétrica, é mudado o tempo de tratamento a eficiência muda em maior grau (rodada 5 e 6) atingindo uma diferença de aproximadamente 20% na redução de turbidez, tornando o tempo de tratamento em condutividades elétricas maiores, mais influente que o pH na redução de turbidez na matriz aquosa estudada.
Nas rodadas 3, 7, 8, 11, 12, 13 e 15, com condutividade inicial de 6250 µS/cm, a eficiência de redução foi bastante reduzida, mostrando que o pH e o tempo de tratamento influenciam na redução de turbidez, porém não são suficientes para melhorar o tratamento em relação à condutividade elétrica. Nesse caso, em pHs extremos dos estudados, a eficiência de redução decaiu, fazendo com que dependesse menos do tempo de tratamento e agora, mais do pH, tendo 54,87% e 62,84% para pH de 6 e 9, respectivamente. Ainda é possível observar a relação limite de entre 7,5 e 8 UNT de turbidez para 9 de pH (rodadas 13 e 15), consoante à ineficiência na redução das unidades de turbidez pela produção de partes de alumínio insolúvel como exposto por Holt et al. (2002).
Esse comportamento é esperado, pois o tempo de tratamento mais prolongado permite que o processo de coagulação e flotação seja mais completo, favorecendo a redução de partículas em suspensão. Da mesma forma, uma condutividade elétrica mais elevada facilita o fluxo de corrente entre os eletrodos, promovendo a formação de hidróxidos de alumínio, que agem como coagulantes. No entanto, a condutividade elétrica se torna o fator que rege as reações e eficiência é como demonstrado pelas rodadas 6 e 14, onde a mudança somente da condutividade influenciou significativamente a eficiência de redução na ordem de diferença de 31,21%. A rodada com menor

eficiência, como a rodada 3, indica que tempos de tratamento curtos e CE mais baixos limitam a eficiência do processo de coagulação.
A Tabela 2 apresenta os resultados do estudo experimental sobre o comportamento do pH antes e após o processo eletrolítico.

Tabela 2 - Resultados de alteração de pH de acordo com os parâmetros iniciais

Rodada	CE	TT	pH	pH pós-filtração
1	5500	12,5	6,0	7,33
2	5500	12,5	9,0	8,77
3	6250	5,0	6,0	6,55
4	5500	5,0	7,5	7,70
5	7000	5,0	7,5	7,75
6	7000	20,0	7,5	6,92
7	6250	12,5	7,5	7,18
8	6250	12,5	7,5	7,18
9	5500	12,5	9,0	7,06
10	7000	12,5	6,0	6,32
11	6250	20,0	6,0	6,70
12	6250	12,5	7,5	7,68
13	6250	20,0	9,0	7,85
14	5500	20	7,5	7,81
15	6250	5,0	9,0	8,80

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Conforme os dados, o processo geralmente resulta em uma leve alcalinização ou estabilização do pH, Nas rodadas onde o pH inicial era mais ácido, o pH aumentou após o tratamento. Já em rodadas com pH inicial mais alcalino, como na rodada 2, houve uma leve redução do pH pós-filtração. Já em rodadas como a rodada 15, com pH inicial de 9, o pH pós-filtração chegou a 8,8, um valor relativamente alto para o processo de coagulação. Esses resultados reforçam os apresentados por G. Chen, X. Chen, e P.L. Yue (2000), em que o pH tende se tornar mais ácido em condições alcalinas e mais alcalino em condições ácidas.
O processo geralmente resulta em uma leve alcalinização ou estabilização do pH, como por exemplo nas rodadas onde o pH inicial era mais ácido, como na rodada 1 e 3, o pH aumentou após o tratamento. Já em rodadas com pH inicial mais alcalino, como na rodada 2, houve uma leve redução do pH pós-filtração. Nessas rodadas com pH inicial mais baixo, onde o pH inicial era 6, o pH pós-filtração foi mantido próximo a 6,55. Já em rodadas como a rodada 15, com pH inicial de 9, o pH pós-filtração chegou a 8,8, um valor relativamente alto para o processo de coagulação. Esses resultados reforça os resultados apresentados por G. Chen, X. Chen, e P.L. Yue (2000) e também por, em que o pH tende se tornar mais ácido em condições alcalinas e mais alcalino em condições ácidas.
A Tabela 3 apresenta os resultados referentes à redução de cor. Em todas as rodadas, a cor inicial da água bruta foi registrada como 100 uH.

Tabela 3 - Resultados de redução de cor de acordo com os parâmetros iniciais

Rodada	CE	TT	pH	Cor bruta	Cor pós-filtração
1	5500	12,5	6,0	100	80
2	5500	12,5	9,0	100	60
3	6250	5,0	6,0	100	60
4	5500	5,0	7,5	100	80
5	7000	5,0	7,5	100	60
6	7000	20,0	7,5	100	40
7	6250	12,5	7,5	100	80

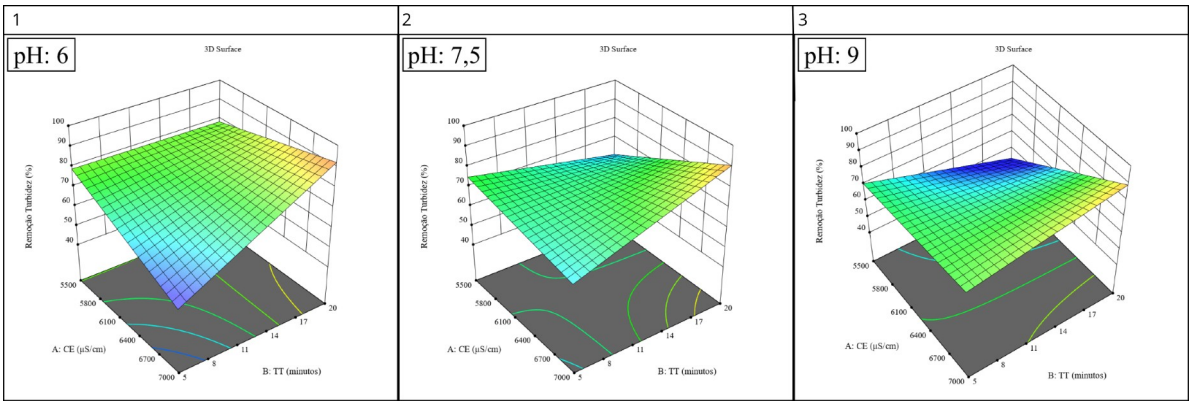
8	6250	12,5	7,5	100	80
9	5500	12,5	9,0	100	60
10	7000	12,5	6,0	100	40
11	6250	20,0	6,0	100	60
12	6250	12,5	7,5	100	60
13	6250	20,0	9,0	100	60
14	5500	20	7,5	100	60
15	6250	5,0	9,0	100	80

Fonte: Elaboração própria, 2025.

As remoções de cor, como abordado por Grecco et al. (2022) e Sillanpää e Shestakova (2017), foram menores em condutividades menores (de 5500 e 6250 µS/cm) e tempo de tratamento também menores (5 e 12,5 minutos), isso se dá pela menor formação de hidróxidos, ocasionados pela condutividade baixa, ou ainda pelo tempo de tratamento insuficiente. Diferentemente, quando foram utilizadas condutividades maiores (7000 µS/cm) e tempos de tratamento maiores (20 minutos) a cor apresentou maiores remoções, devido também, tanto ao maior tempo de contato dos hidróxidos quanto pela quantidade de bolhas geradas durante o processo advindas da condutividade maior, confirmando a relação entre condutividade e tempo de tratamento trazidas pelos autores supracitados.

As superfícies ilustram a influência simultânea de dois fatores sobre a eficiência de redução de turbidez, mantendo o terceiro fator constante, sendo fundamentais para identificar as melhores condições operacionais para maximizar a eficiência do tratamento.
A Figura 3 representa a redução de turbidez em função da CE, do TT e pH fixo em 6 (1); CE, do TT e pH fixo em 7,5 (2); e CE, do TT e pH fixo em 9 (3), evidenciando o comportamento do processo eletrolítico em diferentes condições para o tratamento da matriz aquosa analisada.

Figura 3 – Superfícies de resposta em função do CE e TT, pH fixo em 6; 7,5; e 9



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Conforme ilustrado na Figura 3 (1), o sistema atinge sua condição otimizada: tempos superiores a 17 minutos garantem uma redução próxima a 90%. Isso ocorre porque esse nível de acidez é ideal para a formação de hidróxidos de alumínio, que atuam como coagulantes altamente eficientes para desestabilizar os coloides. Embora o aumento da condutividade elétrica também contribua positivamente ao promover a dissolução eletroquímica do ânodo, seu impacto é secundário em relação ao tempo prolongado.

Por outro lado, os pHs de 7,5 e 9 demonstram que a eficiência do sistema decai significativamente à medida que o meio se torna mais alcalino, tornando o processo muito menos sensível às variações de tempo e condutividade. Em pH 7,5, o sistema entra em uma faixa de transição onde a formação do hidróxido coagulante diminui, fazendo com que a redução estacione em cerca de 80%, mesmo com tempos próximos a 20 minutos. Esse cenário se agrava em pH 9, que representa a condição menos favorável do estudo: nessa faixa, predominam espécies de alumínio altamente solúveis, como o $Al(OH)_4^-$, que comprometem a coagulação. Nessas condições alcalinas, o impacto do

tempo e da condutividade elétrica torna-se mínimo, confirmando que a eletrocoagulação exige a manutenção de pHs mais ácidos para maximizar a redução de partículas.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pelas análises de superfície de resposta, constatou-se que o aumento no tempo de tratamento proporciona elevação direta e substancial na redução da turbidez. Essa métrica obedece a cinética do tratamento, na qual um maior período de contato permite uma desestabilização contínua e a formação mais ampla de hidróxidos de alumínio.
Da mesma forma, as variações de condutividade mais altas (como 7000 µS/cm) provaram auxiliar muito no rendimento das interações químicas, uma vez que elas ativam o fluxo da corrente com maior facilidade e estimulam o desprendimento eficiente de microbolhas para flotação.
Ao avaliar o comportamento com o pH fixado através da superfície, nota-se que o pH inicial igual a 6 apresentou o cenário cinético ideal, quando combinado com altos tempos, alcançando a proximidade de 90% de eficiência assim que o tempo passou da marca de 17 minutos, devido à rápida formação da espécie insolúvel Al(OH)3.
No pH 7,5, por outro lado, a eficiência se estabiliza de maneira levemente mais baixa (apoximadamente 80%), uma vez que neste pH de transição há menor formação do hidróxido ideal e a presença emergente de ânions solúveis do tipo $Al(OH)4^{-}$, que são menos eficazes como coagulantes.
Ademais, quando operando no pH 9, o processo mostra a pior configuração das reações: a solubilidade acentuada das espécies de alumínio em ambiente básico derruba as interações e prejudica a coagulação independentemente da alteração da condutividade, estabilizando-se forçosamente próximo aos 80% sem conseguir progressos expressivos.
Os resultados obtidos são do processo em escala de bancada. Embora a eletrocoagulação se mostre uma alternativa tecnicamente viável para a redução de turbidez e cor, a sua implementação como pré-tratamento em escala real necessita de uma transição para uma ETA operando, a qual demanda estudos em plantas-piloto para avaliar, principalmente, o consumo energético e o desgaste dos eletrodos de alumínio de forma contínua.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que a tecnologia da eletrocoagulação é plenamente viável na mitigação da carga de cor e de turbidez advinda de eutrofização. O delineamento de Box-Behnken cumpriu a função investigativa, provando que é preciso dar um peso maior aos fatores do TT e CE para extrair a eficiência máxima de redução (96,42%).
Recomenda-se para trabalhos futuros e para o escopo produtivo que os processos se estruturem focando em pH mais ácidos até a neutralidade, evitando a alcalinização excessiva inicial que compromete a insolubilidade dos agregados hidrolisados de alumínio necessários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMMAR, R., KAZPARD, V., EL SAMRANI, A.G., AMACHA, N., SAAD, Z., CHOU, L. Hydrodynamic influence on reservoir sustainability in semi-arid climate: A physicochemical and environmental isotopic study. Journal of Environmental Management, v.197, p.571-581, 2017.
2. CAVALCANTE, R., NASCIMENTO, R., ARAUJO, F.J., DA SILVA, L. Uso de tecnologia eletrolítica com corrente pulsada no pré tratamento de águas eutrofizadas no sertão central cearense-brasil. Centro de Congressos INEC, 16° Congresso da Água, v.1, p.48-49, 2023.
3. CHEN, X., CHEN, G., YUE, P.L. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. Chemical Engineering Science, v.57, n.13, p.2449-2455, 2002. Disponível em https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00147-1.
4. CIRILO, J.A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. Estudos Avançados, v.22, n.63, p.61-82, 2008. Disponível em https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200005. Acesso em: 31/08/2024.
5. GRECCO, L.H.A., SOUZA, B.C.A., ZANONI, M.V.B. Eletrocoagulação/eletrofloculação para tratamento de águas residuárias: eletrodos não convencionais e acoplamento de técnicas. Química Nova, v.45, n.4, 2022. Disponível em https://www.scielo.br/j/qn/a/yvJSLtRbXYQTqrkjyhZBGyy/#. Acesso em: 29/08/2024.
6. MAO, L., LIU, X., WANG, H., LI, Y., TANG, Q., ZHANG, H. Evaluation of ecological and human health risks of heavy metals in sediments from the Yellow River, China. Science of The Total Environment, v.872, 2023. Disponível em https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019338073. Acesso em: 29/08/2024.

7. NETO, E.F.A. Pré e pós-tratamento por eletro-oxidação associada à fotocatálise heterogênea em uma ETA por filtração direta visando a redução dos precursores dos compostos organoclorados. Fortaleza, 2012. Tese de doutorado-Universidade Federal do Ceará, 2012.
8. SILLANPÄÄ, M., SHESTAKOVA, M. Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.