

V.12, n.7, dezembro/2025 – DOI: 10.20873/saberesemcirculação14

TRATAMENTO DE CHORUME SINTÉTICO POR PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO (POA) EMPREGANDO O REAGENTE FENTON

TREATMENT OF SYNTHETIC LEACH BY ADVANCED OXIDATIVE PROCESS (AOP) USING FENTON REAGENT

TRATAMIENTO DE LIXIVIACIÓN SINTÉTICA POR PROCESO OXIDATIVO AVANZADO (POA) UTILIZANDO REACTIVO FENTON

Rosinete Nogueira Sousa

E-mail: ns.rosinete@gmail.com

José Victor Oliveira Bringel Bezerra

E-mail: josevictor.bringel@gmail.com

Mateus Rodrigues Brito

E-mail: rodriguesmr21@gmail.com

Matheus Gomes Arruda

E-mail: Elaine da Cunha Silva Paz

Claudia da Silva Aguiar Rezende

E-mail: claudia@ifto.edu.br

Marcelo Mendes Pedroza

E-mail: mendes@ifto.edu.br

Como citar este artigo:

SOUSA, R. N. et al. Tratamento de chorume sintético por Processo Oxidativo Avançado (POA) empregando o reagente Fenton. **Desafios. Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**. Palmas, v. 12, n. 7, p. 07-31, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20873/saberesemcirculação14>

ABSTRACT:

Several techniques have been studied in the treatment of leachate from sanitary landfills. Among them, there are the Advanced Oxidative Processes (AOP's). Given the above, this research aimed to evaluate the effect of AOP using Fenton's reagent, at different concentrations of iron (Fe) and hydrogen peroxide (H₂O₂), in the treatment of synthetic slurry. An estimation method (Swiss method) was applied to the leachate flow from a controlled sanitary landfill. A test was carried out with a solution of methylene blue and distilled water, to verify the efficiency of the treatment technique. After the test run with methylene blue, a synthetic slurry was prepared and the Fenton solution was added. The result of estimating percolate production, using the Swiss method, was 2.15 L/s. For the methylene blue degradation test, the highest dye reduction was obtained in test 10 (absorbance equal to 0.010). For manure degradation, the best concentrations used for the highest Chemical Oxygen Demand (COD) removal were observed in test 3 (73%) where the H₂O₂ dosage was 0.32mM and Fe²⁺ 0.09mM. The POA using the Fenton reagent proved to be a very effective alternative.

KEYWORDS: Leachate; Chemical Oxygen Demand; Effluent Oxidation; Sanitary Landfill.

RESUMO:

Diversas técnicas vêm sendo estudadas no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Dentre elas, tem-se os Processos Oxidativos Avançados (POA's). Diante o exposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito do POA empregando o reagente de Fenton, em diferentes concentrações de ferro (Fe) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂), no tratamento de chorume sintético. Foi realizada a aplicação de método de estimativa (método suíço) da vazão de percolado de um aterro sanitário controlado. Foi realizado um ensaio teste com uma solução com o azul de metileno e água destilada, para verificar a eficiência da técnica de tratamento. Após o ensaio teste com o azul de metileno, foi preparado um chorume sintético e adicionou-se a solução Fenton. O resultado de estimativa de produção de percolado, pelo método suíço, foi de 2,15 L/s. Para o teste de degradação do azul de metileno, obteve-se a maior redução de corante o ensaio 10 (absorbância igual a 0,010). Para a degradação do chorume, as melhores concentrações utilizadas para a maior remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) foram observadas no ensaio 3 (73%) onde a dosagem de H₂O₂ foi de 0,32mM e de Fe²⁺ 0,09mM. O POA utilizando o reagente Fenton, mostrou-se como uma alternativa bastante eficaz.

PALAVRAS-CHAVE: Lixiviado; Demanda Química de Oxigênio; Oxidação de efluentes; Aterro Sanitário.

RESUMEN:

Se han estudiado varias técnicas en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Entre ellos, se encuentran los Procesos Oxidativos Avanzados (POA's). Dado lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de AOP utilizando el reactivo de Fenton, a diferentes concentraciones de hierro (Fe) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂), en el tratamiento de lodos sintéticos. Se aplicó un método de estimación (método suizo) al flujo de lixiviados de un relleno sanitario controlado. Se realizó una prueba de ensayo con una solución de azul de metileno y agua destilada, para comprobar la eficacia de la técnica

de tratamiento. Después de la prueba con azul de metileno, se preparó una suspensión sintética y se añadió la solución de Fenton. El resultado de estimar la producción de percolado, por el método suizo, fue de 2,15 L/s. Para la prueba de degradación del azul de metileno, la mayor reducción de colorante se obtuvo en la prueba 10 (absorbancia igual a 0,010). Para la degradación del estiércol, las mejores concentraciones utilizadas para la mayor remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) se observaron en la prueba 3 (73%) donde la dosis de H_2O_2 fue de 0,32 mM y Fe^{2+} 0,09 mM. El POA que utiliza el reactivo de Fenton demostró ser una alternativa muy efectiva.

Palabras clave: Lixiviado; Demanda Química de Oxígeno; Oxidación de efluentes; Relleno sanitario.

INTRODUÇÃO

O crescente aumento demográfico, juntamente com o aumento de produção e consumo, faz com que, conseqüentemente, haja um aumento gradativo na geração de resíduos sólidos (Goetten *et al.*, 2019; Lopes e Silva, 2021). No Brasil, a Lei Federal nº 12.305/2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define diretrizes para o gerenciamento adequados dos resíduos sólidos.

No Brasil a destinação mais indicada e segura para a destinação de resíduos sólidos é o aterro sanitário. No entanto, de acordo com PNRS, esta destinação é indicada apenas para os rejeitos.

Um gerenciamento eficiente deverá, primeiramente, aplicar as seguintes medidas: redução, reutilização, reciclagem, aproveitamento energético e outras finalidades. Somente o que não tiver nenhum proveito (rejeitos) deverá destinar-se aos aterros (Engelmann *et al.* 2020), afim de reduzir o volume de rejeitos, facilitar o gerenciamento dos mesmos e controlar o tempo de vida útil dos aterros sanitários.

A gestão inadequada de um aterro sanitário pode vir a provocar sérios impactos ao meio ambiente, como a contaminação do solo e água pelo chorume (percolado) (Ogata et al., 2018; Lee, Ko e Kim, 2020), este caracterizado como um líquido escuro e viscoso gerado pela infiltração da água em contato com decomposição de resíduos do aterro sanitário.

Apesar do alto percentual de matéria orgânica, o lixiviado, não pode ser considerado um efluente orgânico, já que possui em sua composição contaminantes tóxicos (Da Silva *et al.*, 2020). Segundo Izario Filho *et al.* (2020) podem ser encontrados no chorume: matéria orgânica (biodegradável e não biodegradável), compostos nitrogenados, metais pesados e compostos tóxicos.

Diversas técnicas vêm sendo estudadas para aplicação no tratamento de chorumes. Dentre estas tem-se os Processos Oxidativos Avançados (POA's) que promove a degradação de moléculas orgânicas e poluentes (como metais, ácidos e outros), através de um radical, com alto poder de oxidação, a hidroxila ($\bullet\text{OH}$). Este composto pode ser gerado a temperatura ambiente em meios homogêneos ou heterogêneos, com ou sem a presença de luz (Albuquerque *et al.*, 2020).

O sistema Fenton é um tipo de POA que ocorre na ausência de luz e promove degradação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) pelo ferro (Fe), para produção de $\bullet\text{OH}$. Este sistema possui menor custo e maior facilidade de operação, comparado com outros tipos de POA's (Shi *et al.*, 2018). A eficiência dos processos Fenton já é comprovada e amplamente utilizada para tratar efluentes (Cirino, Rocha e Silva, 2019).

Neste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito do POA, empregando o reagente de Fenton em diferentes concentrações de ferro (Fe) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), no tratamento chorume sintético.

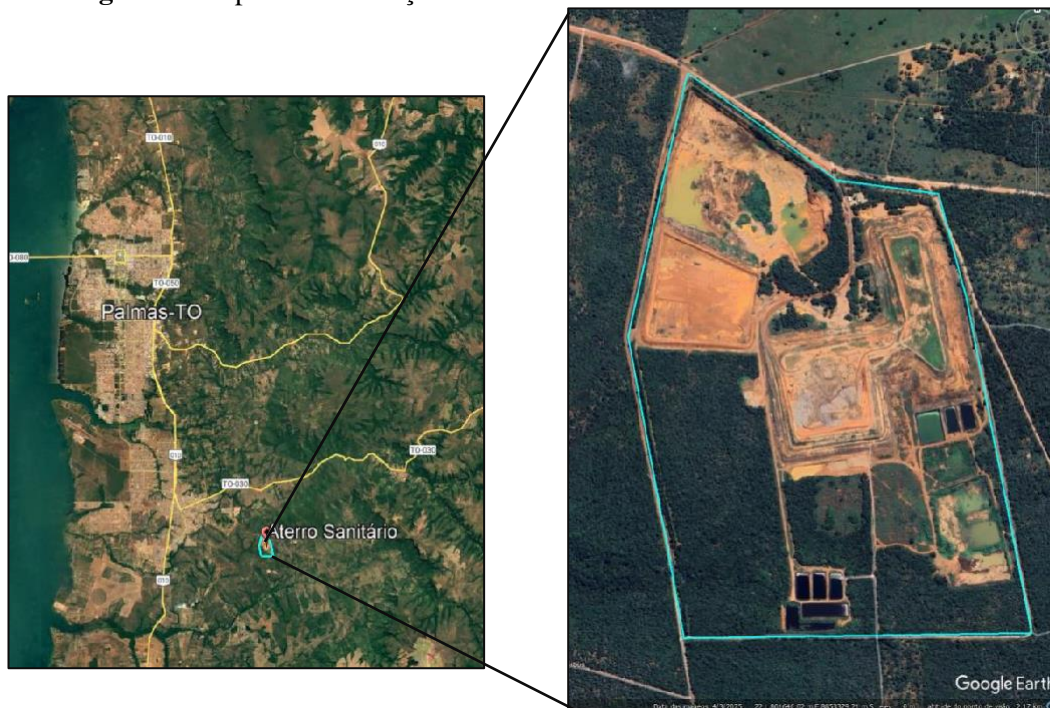
METODOLOGIA

A pesquisa apresentada enquadra-se, segundo a classificação de Marconi e Lakatos (2017), como aplicada, experimental e explicativa. É aplicada porque busca solucionar um problema prático relacionado ao tratamento de chorume, um efluente altamente poluente gerado em aterros sanitários. Trata-se também de uma pesquisa experimental, pois envolve a manipulação controlada de variáveis, neste caso, as concentrações dos reagentes H_2O_2 e Fe^{2+} , para avaliar seus efeitos sobre a eficiência do processo de degradação de contaminantes. É explicativa, uma vez que visa compreender os mecanismos envolvidos na ação do Processo Oxidativo Avançado (POA) com reagente de Fenton, tanto na descoloração de corante modelo (azul de metileno), quanto na remoção da carga orgânica de chorume sintético, expressa em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO). A pesquisa também se apoia em fundamentos estatísticos, utilizando delineamentos experimentais: Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e Delineamento Composto Central (DCC), para analisar os efeitos das variáveis estudadas, assegurando a validade e a confiabilidade dos resultados.

A metodologia foi desenvolvida em etapas bem definidas e sequenciais conforme se apresenta na sequência: (a) estimativa da vazão de chorume do Aterro Sanitário de Palmas utilizando o método suíço; (b) realização de ensaio preliminar utilizando azul de metileno solubilizado em água destilada; (c) aplicação do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para testar diferentes combinações de concentrações dos reagentes; (d) elaboração de um chorume sintético, simulando sua composição com base em contaminantes reais; e (e) realização de testes de tratamento para diferentes dosagens dos mesmos reagentes utilizando um Delineamento Composto Central (DCC).

ÁREA DO ESTUDO

A área de estudo da pesquisa, voltada para a estimativa do cálculo de vazão do lixiviado, é o Aterro Sanitário de Palmas, localizado na área rural do município, cerca de 25 km do centro do plano diretor (Figura 1). As coordenadas do ponto central da área de estudo são: latitude $10^{\circ}21'40.05''S$ e longitude $48^{\circ}14'21.31''O$.

Figura 1- Mapa de Localização do Aterro Sanitário de Palmas-TO.

Fonte: Adaptado de Google Earth, 2025.

De acordo com Marque *et al.* (2020) o aterro recebe aproximadamente 270 ton/dia de Resíduos Sólidos Urbanos. O sistema de drenagem do chorume gerado no aterro é constituído por tubos de concreto perfurados divididos em faixas retangulares na base do aterro. Os drenos são interligados aos de drenagem de gases e direcionam o chorume para o tratamento biológico. O tratamento é do tipo biológico. O sistema de tratamento é composto por 01 lagoa anaeróbia, duas facultativas e uma vala de infiltração. Na última lagoa de decantação a água já conta com mais de 80% de pureza (Tonellotto, 2019).

A quantidade do percolado gerado em um aterro sanitário é um fator importante para o dimensionamento adequado de um sistema de tratamento. A estimativa volumétrica desse líquido é determinada através de métodos baseados em formulações empíricas (Silva *et al.*, 2021).

A vazão de chorume do Aterro Sanitário de Palmas seria determinada na entrada do sistema de lagoas de estabilização do sistema de tratamento de lixiviados, com o auxílio de recipiente plástico com calibração volumétrica e cronômetro. No momento da aferição de vazão, seriam coletadas amostras para ensaios de caracterização do lixiviado e para o teste de degradação química através da reação de Fenton. Entretanto,

devido aos acontecimentos oriundos no ano de 2020, com uma pandemia mundial que assolou todo o mundo, e a interferência das aproximações sociais a aferição da vazão do chorume foi feita de modo estimado, a partir do método suíço.

DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO

A aferição da vazão do chorume do aterro sanitário de Palmas - TO foi feita de modo estimado, a partir da estimativa através do método suíço.

Conforme Lins (2003), a fórmula algébrica para a aplicação do método suíço, onde se estima a vazão do chorume é mostrada na Equação 1.

$$Q = \frac{(P.A.K)}{t} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

Q: vazão média do percolado (L/s);

P: Precipitação média mensal (mm);

A: Área total do aterro (m²);

t: número de segundos em um mês (s);

K: Coeficiente que depende do grau de compactação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

A Tabela 1 apresenta os valores de K para a aplicação do método suíço.

Tabela 1 – Valores de K para aplicação do Método Suíço.

Tipo de Aterro	Peso Específico do Lixo	K
Aterros Fracamente Compactados	0,4 a 0,7 ton/m ³	0,25 a 0,50
Aterros Fortemente Compactados	Acima de 0,7 ton/m ³	0,15 a 0,25

Fonte: Rocca, 1981.

Considerando que o aterro sanitário de Palmas – TO possui características de um aterro fracamente compactado, considerou-se um K = 0,5.

REMOÇÃO DE CORANTE AZUL DE METILENO ATRAVÉS DE POA COM REAGENTE DE FENTON

Foi preparada uma solução sintética com uma concentração de 8 mg/L do corante azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) solubilizado em água destilada. Posteriormente foi adicionada a solução Fenton, para que a reação de remoção do corante ocorresse. Os ensaios foram realizados em um reator de 1 litro de capacidade, em regime de batelada, com agitação, tempo de reação de 1 hora, pH ajustado para $3 \pm 0,5$ em temperatura ambiente e sem ausência de luz. Após a reação de degradação fotoquímica, as amostras foram analisadas em espectrofotômetro, a um comprimento de onda de 660 nm.

Um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), utilizando o *software* Protimiza Experimental Design, gerando 11 ensaios (4 pontos fatoriais, 4 pontos axiais e 3 pontos centrais), foi utilizado para verificar o efeito de dois fatores no sistema de descoloração de azul de metileno através do Processo Fenton, observando as melhores dosagens a serem aplicadas durante o processo. Foi considerado como fator 1 a concentração do H_2O_2 (mM) e fator 2 a concentração dos íons Fe^{2+} (mM).

Os domínios das faixas dos parâmetros estudados estão de acordo com Paulino, Araújo e Salgado (2015). Os experimentos foram realizados de acordo com os níveis apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 -Fatores e níveis empregados no planejamento experimental DCCR.

Fatores	Níveis				
	(-1,4)	(-1)	(0)	(+1)	(+1,4)
H_2O_2 (mM)	0,06	0,1	0,2	0,30	0,34
Fe^{2+} (mM)	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07

Fonte: Autores (2025).

A Tabela 3 apresenta a ordem dos experimentos adotados nessa pesquisa. Os experimentos foram realizados de forma aleatória.

Tabela 3 - Ordem dos experimentos empregados no planejamento fatorial DCCR.

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	H ₂ O ₂ (mM)	Fe ²⁺ (mM)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1,4	0
9	0	1,4
10	1,4	0
11	0	-1,4

Fonte: Autores (2025).

DEGRADAÇÃO QUÍMICA DE CHORUME ATRAVÉS DE POA COM REAGENTE DE FENTON

Nessa pesquisa foi empregado um efluente sintético devido as dificuldades encontradas para se coletar a amostra “*in locu*”, então foi simulado as características químicas de chorume de aterro sanitário. A Tabela 4 apresenta as quantidades das substâncias empregadas na preparação de 1 litro do efluente sintético. O efluente sintético preparado foi diluído na razão 1:100 com água destilada para o início dos ensaios.

Tabela 4 – Composição química do chorume sintético empregado na pesquisa.

Constituintes	Quantidade (mg)
Humate de sódio	250
Cloreto de Amônio (NH ₄ Cl)	191
Cloreto de cálcio di-hidratado (CaCl ₂ .2H ₂ O)	36,7
DICLORETO DE MAGNÉSIO DI-HIDRATADO (MGCL ₂ .2H ₂ O)	83,6
Cloreto de cádmio hemipentahidratado (CdCl ₂ .2,5H ₂ O)	2,0
Cloreto de Níquel II Hexahidratado (NiCl ₂ .6H ₂ O)	4,0
Sulfato de Zinco (ZnSO ₄ .7H ₂ O)	4,4
Cloreto de manganês (II) tetra hidratado (MnCl ₂ .4H ₂ O)	3,6
Dicromato de potássio (K ₂ Cr ₂ O ₇)	5,7

CLORETO DE FERRO (III) HEXAHIDRATADO 4,8
($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

Nitrato de chumbo II ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) 2,2

Fonte: Adaptado de Dan *et al.*, (2017).

Após a etapa de oxidação, o sistema foi neutralizado com solução de Cal a 5 %, deixando o reator em repouso. Alíquotas do líquido sobrenadante foram coletadas para determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO), que foi realizada pelo método SMEWW 5220D (APHA, 2005).

Foi verificado por meio de Delineamento Composto Central (DCC), através do *software* Protimiza Experimental Design, gerando 7 ensaios (4 pontos fatoriais e 3 centrais), o efeito de dois fatores no sistema de remoção de DQO de amostra de chorume sintético através do Processo Fenton, sendo considerado como fator 1 a concentração do H_2O_2 (mM) e fator 2 a concentração dos íons Fe^{2+} (mM). O Delineamento utilizado gerou 07 tipos de combinações entre os fatores. Os experimentos foram realizados de acordo com os níveis apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Fatores e níveis empregados no DCC.

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
H_2O_2 (mM)	0,32	0,34	0,36
Fe^{2+} (mM)	0,07	0,08	0,09

Fonte: Autores (2025).

A Tabela 6 apresenta a ordem real dos experimentos realizados nesta pesquisa. Os ensaios foram conduzidos de forma aleatória, e a ordem aqui listada é apenas ilustrativa.

Tabela 6- Ordem dos experimentos empregados no DCC.

Ordem dos Experimentos	Fatores	
	H_2O_2 (mM)	Fe^{2+} (mM)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	0	0

6	0	0
7	0	0

Fonte: Autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

DETERMINAÇÃO DE VAZÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE PALMAS - TO

A estimativa da geração teórica de chorume produzido pelo Aterro Sanitário de Palmas – Tocantins, partiu da simulação computacional conforme a aplicação do Método Suíço.

Para a execução da modelagem matemática, foram obtidos os dados meteorológicos disponibilizados pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), conforme apresentado na tabela 7.

Tabela 7- Dados de Precipitação Média do município de Palmas – TO em 2020.

Meses (2020)	P - Precipitação Média (mm)
Janeiro	245
Fevereiro	220
Março	170
Abril	100
Maio	15
Junho	5
Julho	0
Agosto	5
Setembro	20
Outubro	120
Novembro	195
Dezembro	210
Referência	SONDA, INPE, 2022

Fonte: Autores (2025).

Os dados utilizados no suíço são referentes ao mês de outubro de 2020, onde começam as primeiras chuvas no município de Palmas – TO.

A Tabela 8 apresenta os dados utilizados e a estimativa vazão do método suíço.

Tabela 8- Valores utilizados para cálculo de vazão pelo Método Suíço.

Coefficientes	Valores
P = Precipitação média mensal (mm)	120 mm
A = Área de contribuição (m ²)	92.914
t = número de segundos em um mês	2.592.000
K = Coeficiente de compactação	0,5
Q = vazão do percolado (l/s)	2,15

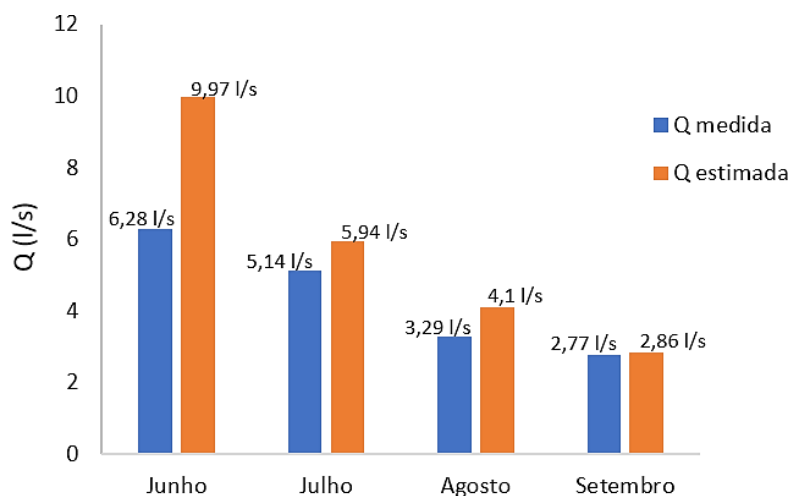
Fonte: Autores (2025).

A baixa produção de chorume gerado pelo aterro, obtida através do método suíço (2,15 l/s), é justificada devido ao pequeno índice pluviométrico registrado na região de instalação e influência do Aterro Sanitário de Palmas, cerca de 120 mm, no mês de outubro, o que de certa forma contribui diretamente com os dados demonstrados pela presente modelagem matemática, visto que, a pluviosidade é o fator principal para a produção de percolado no Aterro Sanitário.

Lins e Jucá (2004) realizaram a comparação da vazão estimada, pelo método suíço, com a vazão medida do chorume Aterro de Muribeca, nos meses de junho, julho, agosto e setembro, que apresentavam, respectivamente, os seguintes valores de precipitação média: 474 mm, 282.2 mm, 194.8mm e 135.8 mm. A área do Aterro de Muribeca é de estudo 363.503 m² e o K utilizado foi de 0,15. Os autores obtiveram como resultado os dados apresentados na Figura 2.

De acordo com o mesmo percebe-se que em todos os ensaios a Q estimada foi superior a Q medida. O mês de junho apresentou maior diferença entre as vazões (3,69 l/s) e setembro o mês que apresentou menor diferença (0,09 l/s), representando, respectivamente erro de 37,01% e 3,1%. O mês de julho apresentou erro de 13,90 e agosto de 19,95%.

Figura 2- Dados de Vazão (l/s) medida e estimada pelo método suíço do Aterro de Muribeca (2003).



Fonte: Autores, 2025.

Dados: Lins e Jucá, 2004.

Apesar dos valores das variáveis utilizadas por Lins e Jucá (2004) serem diferentes das utilizadas no presente estudo, o resultado obtido pelos autores, foram de suma importância, para comparação, pois foi através do mesmo foi verificar a eficiência do método utilizado, considerada insatisfatória, com exceção ao resultado obtido no mês de setembro.

O Método Suíço é um método simples e de fácil utilização, no entanto é muito limitado em relação às variáveis que são utilizadas para avaliação do balanço hídrico (Catapreta, 2008). Segundo Capelo Neto *et al.* (1999) o método deixa a desejar no que diz respeito à precisão.

ENSAIO DE REMOÇÃO DE CORANTE ATRAVÉS DE POA COM REAGENTE DE FENTON

Os resultados experimentais obtidos no planejamento DCCR no ensaio de remoção de corante através de POA com reagente de Fenton são apresentados na

Tabela 9 absorvância do corante foi considerada a resposta do planejamento experimental, mostrando o quanto a luz transpassou no recipiente ensaiado indicando as eficiências de remoção, ou seja, valores mais baixos indicam as melhores remoções.

Tabela 9- Resultados dos valores da absorbância obtidos através do ensaio de remoção de corante através de POA com reagente de Fenton.

Ordem dos Experimentos	Variáveis Codificadas		Variáveis Reais		Resposta
	X ₁ (mM)	X ₂ (mM)	H ₂ O ₂ (mM)	Fe ²⁺ (mM)	Absorbância (-)
1	-1	-1	0,1	0,02	0,348
2	+1	-1	0,30	0,02	0,090
3	-1	+1	0,1	0,06	0,510
4	+1	+1	0,30	0,06	0,062
5	0	0	0,2	0,04	0,330
6	0	0	0,2	0,04	0,330
7	0	0	0,2	0,04	0,320
8	-1,4	0	0,06	0,04	0,412
9	0	1,4	0,2	0,07	0,300
10	1,4	0	0,34	0,04	0,010
11	0	-1,4	0,2	0,01	0,450

Fonte: Autores (2025).

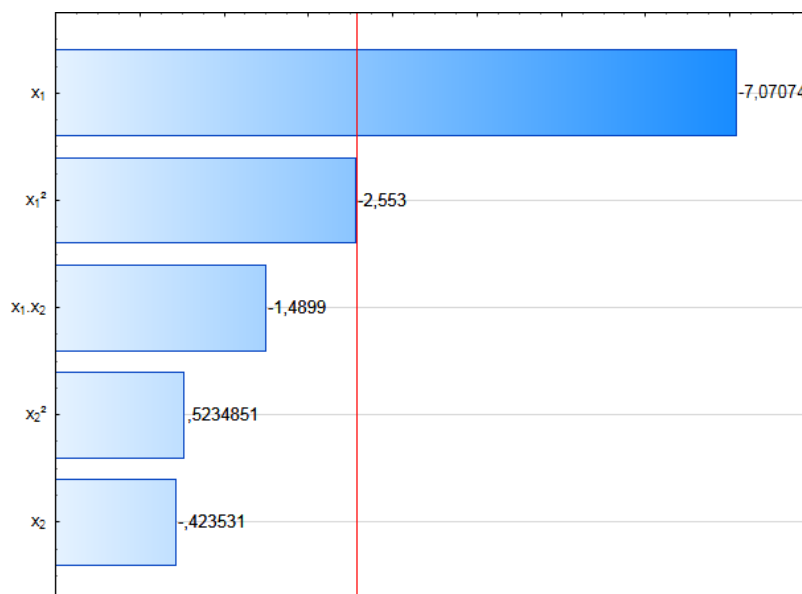
A menor absorbância foi registrada no ensaio 10 (0,010), indicando remoção praticamente total do corante azul de metileno (cerca de 100%). Ao comparar o ensaio 10 com o ensaio 8, que diferiam apenas na concentração de H₂O₂ (mM), verifica-se que a maior concentração desse reagente proporcionou maior eficiência na remoção do corante.

Paulino, Araújo e Salgado (2015) ao utilizar 0,10 mM de H₂O₂ e 0,05 mM de Fe²⁺, condições semelhantes às do ensaio 3, obtiveram eficiência de 80,6% de remoção de azul de metileno. Já nas condições de 0,25 mM de H₂O₂ e 0,05 mM de Fe²⁺ a eficiência aumentou para 96,2%.

Dutta *et al.* (2001) investigaram a degradação do corante azul de metileno por reações do tipo Fenton, identificando as concentrações ideais de Fe²⁺ e H₂O₂ como $3,58 \times 10^{-5}$ mol dm⁻³ e $4,41 \times 10^{-4}$ mol dm⁻³, respectivamente. Com essas concentrações, foi possível degradar uma solução de corante de $3,13 \times 10^{-5}$ mol dm⁻³ a 299 K, alcançando uma taxa de degradação de 90% após 10 minutos.

Giwa et al. (2020) alcançaram eficiência de 98,8% na degradação de azul de metileno, utilizando 4 mM de Fe²⁺ e 70 mM de H₂O₂, com uma concentração inicial de 20 mg/L de corante, a 318 K e pH 3,0, após 30 minutos de reação.

Em análise ao Diagrama de Pareto (Figura 3) observa-se as variáveis em ordem de importância para o modelo de regressão. A linha vertical mostra que os coeficientes estão significativos em nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Figura 3- Representação do Diagrama de Pareto obtido a partir do DCCR na remoção de corante através de POA com reagente de Fenton.

Fonte: Autores (2025).

De acordo com o Diagrama de Pareto (Figura 3) é possível observar que apenas a variável X_1 (H_2O_2) está a frente da linha vertical, ou seja, o que demonstra ser a única variável que teve efeito significativo na degradação do corante de azul de metileno nas amostras.

Avaliando o ensaio 8 e 10, que são os pontos axiais que variavam apenas a quantidade de H_2O_2 , percebe-se que o ensaio 10, que obtinha maior concentração de H_2O_2 , obteve maior remoção do corante azul de metileno (absorbância: 0,010) em relação ao ensaio 8 (absorbância: 0,412).

Com o intuito de verificar o efeito das variáveis e suas interações, em nível de significância de 5%, foram gerados os cálculos de coeficientes de regressão dos fatores lineares, quadráticos e das interações, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10- Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR 2² obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	0,33	0,04	8,80	0,0003
X_1	-0,16	0,02	-7,01	0,0009
X_1^2	-0,07	0,03	-2,51	0,0538
X_2	-0,01	0,02	-0,43	0,6855
X_2^2	0,01	0,03	0,52	0,6261
$X_1 * X_2$	-0,05	0,03	-1,48	0,1997

$X_1 = H_2O_2$, (mM), $X_2 = Fe^{2+}$ (mM).

Fonte: Autores (2025).

Os dados apresentados na Tabela 10 mostra que apenas a variável linear X_1 (H_2O_2) foi significativa.

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível obter o modelo ajustado que descreve a remoção de corante de azul de metileno através de POA com Reagente de Fenton empiricamente, conforme Equação 3.

$$\text{Absorbância (-)} = 0,327 - 0,16 \cdot X_1 - 0,0694 \cdot X_1^2 - 0,0096 \cdot X_2 + 0,0142 \cdot X_1^2 - 0,0475 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde: $X_1 = H_2O_2$ (mM);

$X_2 = Fe^{2+}$ (mM).

Para avaliar a qualidade de ajuste do modelo matemático foi gerada uma análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – ANOVA para a degradação de corante de azul de metileno através de POA com reagente de Fenton.

Fonte de Variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F. calculado	p- valor
Regressão	0,241	5	0,048	11,9	0,00835
Resíduos	0,008	5	0,004		
Falta de ajuste	0,005	3	0,002	206,2	0,00483
Erro Puro	1,9E-5	2	9,7E-6		
Total SS	0,250	10			

$R^2 = 0,9238$; $F_{\text{tabelado}} (5; 5) = 5,05$.

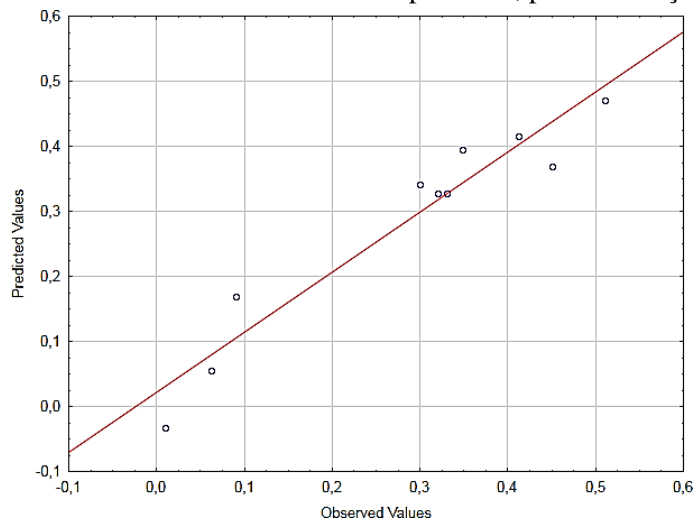
Fonte: Autores (2025).

De acordo com a Tabela 11 verificou-se que $F_{\text{cal}} (\text{regressão/resíduos})$ foi maior que o F_{Tabelado} , sendo assim uma regressão significativa. O R^2 do referido modelo foi de 0,9238 que significa que 92,38 % dos dados foram bem representados.

A

Figura 4 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado. Observa-se um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa.

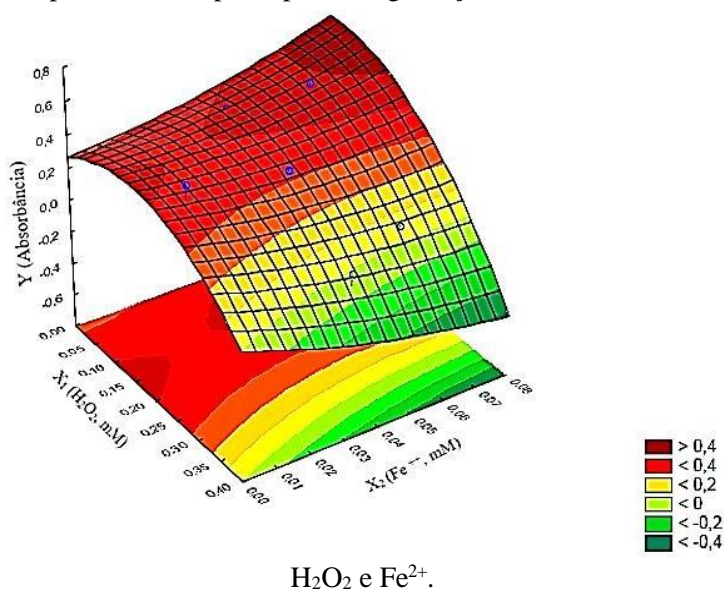
Figura 4 – Valores observados versus valores previstos, para a remoção de corante.



Fonte: Autores (2025).

Os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A mínima quantidade de absorbância foi obtida em condições de baixo Fe^{2+} e alto H_2O_2 , conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo (Figura 5).

Figura 5 – Superfície de resposta para a degradação de corante, com os fatores de



H_2O_2 e Fe^{2+} .

Fonte: Autores (2025).

ENSAIO DE DEGRADAÇÃO QUÍMICA DE CHORUME SINTÉTICO ATRAVÉS DE POA COM REAGENTE DE FENTON NA REMOÇÃO DE DQO

Os resultados experimentais obtidos no planejamento DCC no ensaio de degradação química de chorume com reagente de Fenton são apresentados na Tabela 12. A DQO foi considerada a resposta do planejamento experimental, evidenciando os resultados de cada ensaio na eficiência de remoção. Valores mais baixos de DQO indicam maior eficiência na remoção.

Tabela 12- Resultados obtidos de DQO da degradação química de chorume sintético através de POA com Reagente de Fenton.

Ordem dos Experimentos	Variáveis codificadas		Variáveis Reais		Resposta
	X ₁ (mM)	X ₂ (mM)	H ₂ O ₂ (mM)	Fe ²⁺ (mM)	Remoção de DQO (%)
1	- 1	- 1	0,32	0,07	72
2	+ 1	- 1	0,36	0,07	59
3	- 1	+ 1	0,32	0,09	73
4	+ 1	+ 1	0,36	0,09	56
5	0	0	0,34	0,08	68
6	0	0	0,34	0,08	69
7	0	0	0,34	0,08	66

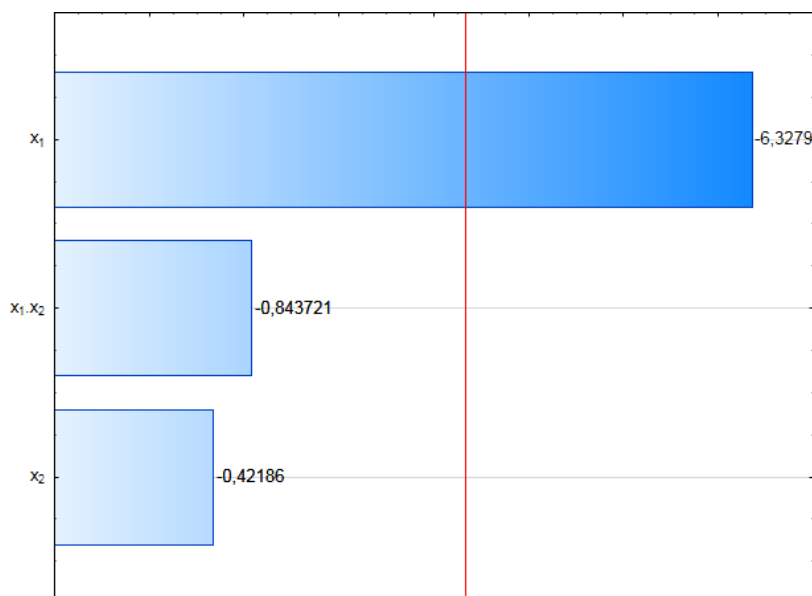
Fonte: Autor (2025).

De acordo com a Tabela 12, a maior remoção de DQO foi observada no ensaio 3 (73%) onde a dosagem de H₂O₂ foi de 0,32 mM e de Fe²⁺ 0,09 mM. Dantas et al. (2021), ao avaliar a eficiência do processo Fenton no tratamento de chorume do aterro municipal de Puxinanã, PB, observaram uma eficiência média de remoção de DQO total de 87%, sob as condições de concentração de Fe²⁺ de 5 g/L e razão molar H₂O₂/Fe²⁺ de 9. Por outro lado, Thind e Jinh (2020), ao investigar a eficiência do processo Fenton no tratamento de chorume do aterro municipal de Daddu Marjra, em Chandigarh, Índia, constataram uma eficiência de remoção de DQO total de 59,19%, com concentrações de H₂O₂ de 2,66 g/L e Fe²⁺ de 47,29 mg/L.

De acordo com os resultados obtidos e considerando as duas variáveis independentes (H₂O₂ e Fe²⁺) e uma dependente (DQO), foi possível realizar uma análise estatística, obtendo diversos dados, dentre eles o Diagrama de Pareto (Figura 6). É possível observar que apenas a variável “1” (H₂O₂) está a frente da linha vermelha, ou

seja, o que demonstra ser a única variável que teve efeito significativo na degradação do chorume sintético nas amostras analisadas.

Figura 6 - Diagrama de Pareto obtido a partir do DCC na degradação de chorume sintético através de POA com reagente de Fenton.



Fonte: Autores (2025).

Comparando-se os pontos fatoriais que variaram apenas no quantitativo de H_2O_2 , (ensaio 1 e 2; ensaio 3 e 4) nota-se que os ensaios 1 que apresentou menor quantitativo de H_2O_2 , promoveu uma maior remoção de DQO (72%) comparando-se ao ensaio 2 (59%). O mesmo ocorreu com o ensaio 3 (73%) em relação ao ensaio 4 (56%).

A Tabela 13 mostra os coeficientes de regressão das variáveis estudadas na remoção de DQO com adição do íon Fe^{2+} e de H_2O_2 . Foi considerado também o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados a um nível de 5% de significância. Os dados apresentados mostram que apenas a variável linear X_1 (H_2O_2 , mM) foi significativa.

Tabela 13- Coeficientes de Regressão do Planejamento DCCR obtidos da remoção de corante, em intervalo de 95% de confiança.

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Tcalc	p-valor
Média	66,14	0,89	73,82	0,0000
X_1	- 7,50	1,19	-6,33	0,0080
X_2	- 0,50	1,19	-0,42	0,7015
X_1*X_2	- 1,00	1,19	-0,84	0,4608

Fonte: Autores (2025).

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a remoção de demanda química de oxigênio através de POA com Reagente de Fenton empiricamente, conforme Equação 4.

$$\text{Remoção de DQO (\%)} = 66,14 - 7,50X_1 - 0,50X_2 - 1,00 X_1.X_2 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde: $X_1 = \text{H}_2\text{O}_2$ (mM);

$X_2 = \text{Fe}^{2+}$ (mM)

A Tabela 14 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a degradação química de corante de azul de metileno através de POA.

Tabela 14 – ANOVA para a degradação de chorume sintético através de POA com reagente de Fenton.

Fonte de Variação	Soma Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Fcalculado	p- valor
Regressão	230,0	3	76,7	13,6	0,02967
Resíduos	16,9	3	5,6		
Falta de ajuste	12,2	1	12,2	5,2	0,14961
Erro Puro	4,7	2	2,3		
Total SS	246,9	6			

$R^2 = 0,9317$; $F_{\text{tabelado}} (3; 3) = 9,28$.

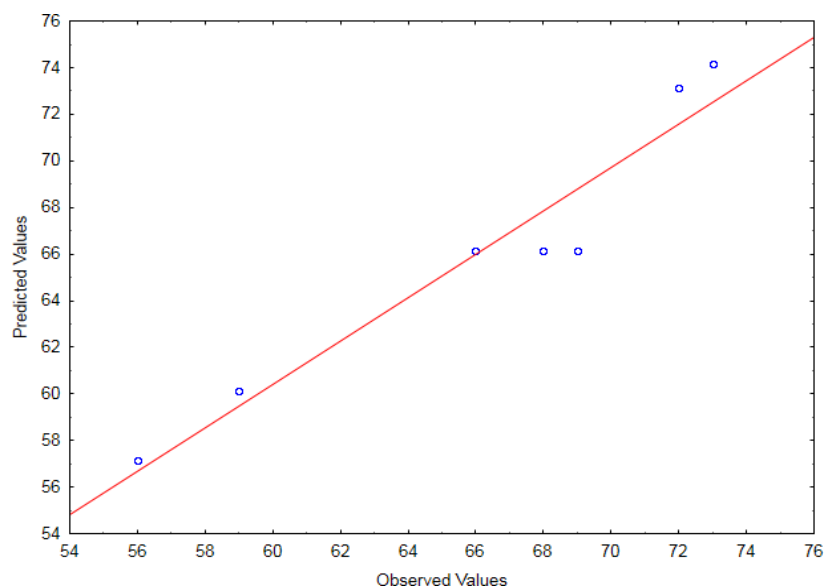
Fonte: Autores (2025).

Verifica-se na o $F_{\text{calculado}}$ (regressão/resíduos) foi superior que o valor de F_{tabelado} , mostrando assim ser uma regressão significativa. O R^2 do referido modelo foi de 0,9328 que significa que 93,28 % dos dados foram bem representados

A

Figura 7 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado. Observa-se um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa.

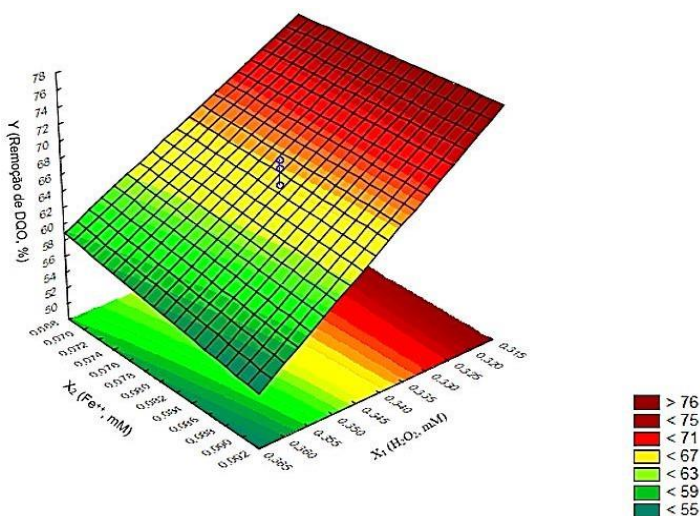
Figura 7 – Valores observados versus valores previstos, para a degradação de chorume sintético.



Fonte: Autores (2025).

Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. A melhor remoção de DQO foi obtida em condições de alto Fe^{2+} e baixo H_2O_2 , conforme observado na superfície de resposta gerada pelo modelo da Figura 8.

Figura 8 – Superfície de resposta para a remoção de DQO, com os fatores de H_2O_2 e Fe^{2+} .



Fonte: Autores (2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A vazão estimada através de empírico método suíço, considerando resultados secundários, mostrou-se inconfiável, apresentando alta variação entre vazão medida e estimada.

A pesquisa sobre a degradação do chorume sintético e a remoção do corante azul de metileno por meio de Processos Oxidativos Avançados (POAs) utilizando o reagente Fenton demonstrou ser uma alternativa eficaz.

O H_2O_2 foi a única variável significativa. A maior quantidade desse composto proporcionou maior remoção do azul de metileno. Nos ensaios de tratamento do chorume sintético, observou-se que menores concentrações de H_2O_2 promoveram maior remoção de DQO.

O tratamento do chorume com Reagente de Fenton mostrou-se atrativo na remoção de DQO, visto que para todos os ensaios, o valor de remoção de DQO ficou acima de 50% sendo que com a melhor dosagem obteve-se valor de 73% de remoção. Portanto, a implementação do Processo Oxidativo Avançado com Reagente de Fenton apresentou eficiência satisfatória na degradação de chorume sintético, tornando-se assim uma alternativa consonante a outros processos promissores de tratamento de efluentes.

Esta técnica possui potencial para maximizar a degradação do chorume e pode ser associada a outros processos de tratamento, como o biológico, que é amplamente utilizado. Essa associação pode aumentar a biodegradabilidade do lixiviado e reduzir o tamanho das lagoas de tratamento."

Referências

ALBUQUERQUE, M.V.C. et al. Remoção de cianobactérias e cianotoxinas presentes em águas de reservatórios eutrofizados por processos oxidativos avançados (POAs). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 61234-61248, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-514>

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition, **American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation**, Washington DC. 2005.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 31 DE AGOSTO DE 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.

CAPELO NETO, J.; MOTA, S.; SILVA, F.J.A. da. Geração de percolado em aterro sanitário no semi-árido nordestino: uma abordagem quantitativa. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 160-167, 1999. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/262765420_Geracao_de_Percolado_em_Aterro_Sanitario_no_Semi-Arido_Nordestino.

CATAPRETA, C.A.A. Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação. **Tese de doutorado**. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2009. Disponível em:< <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/FRPC-7NXGDZ>>.

CIRINO, M.M.M.; ROCHA, L.M.; DA SILVA, M.R.A. Tratamento de Efluentes aplicando combinações de processos convencionais e processos oxidativos avançados. **Revista Augustus**, v. 24, n. 49, p. 24-37, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15202/1981896.2019v24n49p24>.

DA SILVA, F. V. et al. Redução de cor e turbidez no tratamento combinado de esgoto doméstico e lixiviado de aterro sanitário. **Revista Expressão Científica (REC)**, v. 5, n. 3, p. 62-71, 2020. Disponível em: < <https://www.sumarios.org/revista/revista-express%C3%A3o-cient%C3%ADfica-rec?page=2> >.

DAN, A. et al. Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 584, p. 742-750, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.112>

DANTAS, E. R. B. et al. Identificação de compostos orgânicos em lixiviado de aterro sanitário durante tratamento por processo fenton. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 6, p. 274-287, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.006.0023>.

DUTTA, K. et al. Chemical oxidation of methylene blue using a Fenton-like reaction. **Journal of hazardous materials**, v. 84, n. 1, p. 57-71, 2001.DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00202-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00202-3)

ENGELMANN, P. M. et al. Avaliação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Xangri-Lá. **Gestão de resíduos sólidos, Volume 1**, 2020. DOI: 10.36229/978-85-7042-219-4.

GIWA, A. A. et al. Kinetic and thermodynamic studies of fenton oxidative decolorization of methylene blue. **Heliyon**, v. 6, n. 8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04454>.

GOETTEN, W.J. et al. Pré-dimensionamento de um aterro sanitário para o município de Lontas (SC). **Extensão em Foco (ISSN: 2317-9791)**, v. 7, n. 1, p. 130-136, 2019. Disponível em: <https://periodicos.uniarp.edu.br/index.php/extensao/article/view/2088/1026> >.

IZARIO FILHO, H. J. et al. Degradação do carbono orgânico de lixiviado de aterro sanitário por ozonização catalítica em sistema contínuo. **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia Volume 3**, v. 3, p. 141-149, 2020. DOI: 10.36229/978-65-86127-29-4.CAP.20.

MARCONI, M. A.; LAKATOOS, E. M. Fundamentos **de metodologia científica**. – 8. ed. – São Paulo : Atlas, 2017.

LEE, K. S.; KO, K. S.; & KIM, E. Y. Application of stable isotopes and dissolved ions for monitoring landfill leachate contamination. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 42, n. 5, p. 1387-1399, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00427-y>.

LINS, E.A.M. A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca. Dissertação de Mestrado, 125f., 2003. Departamento de engenharia Civil Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5804/1/arquivo6635_1.pdf >.

LINS, E. A. M.; JUCÁ, J.F.T. A utilização de métodos empíricos para a estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2004. Disponível em: https://www.academia.edu/1311993/III_239_A_UTILIZA%C3%87%C3%83O_DA_CAPACIDADE_DE_CAMPO_NA_ESTIMATIVA_DO_PERCOLADO_GERADO_NO_ATERRO_DA_MURIBECA.

LOPES, R. C.; SILVA, R. N. F. Uso de lógica booleana na triagem de áreas aptas para a implantação de aterro sanitário no Município de Campina Verde, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 16, p. 487-499, 2020. DOI: [10.21438/rbgas\(2020\)071603](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071603).

OGATA, Y. et al. Design considerations of constructed wetlands to reduce landfill leachate contamination in tropical regions. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 4, p. 1961-1968, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0755-0>.

PAULINO, T. R. S.; ARAÚJO, R. S.; SALGADO, B. C. B. Estudo de Oxidação Avançada de corantes básicos via reação Fenton (Fe^{2+} / H_2O_2). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 347-352, 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020000111627.

ROCCA, A. C. C. et al. Drenagem sub-superficial em aterros sanitários. **Revista de Limpeza Pública. São Paulo**, v. 8, n. 19, p. 16-27, 1981.

SHI, X. et al. Degradation of organic dyes by a new heterogeneous Fenton reagent-Fe₂GeS₄ nanoparticle. **Journal of hazardous materials**, v. 353, p. 182-189, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.018>.

SILVA, A. F. et al. Estimativa da produção de percolado do aterro de disposição de resíduos sólidos de Boa Vista por meio de metodologias empíricas. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 14, n. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.2.72134>.

SONDA. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Estação De Palmas - Climatologia Local**. Disponível em:<<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/palmas.html>>. Acesso em: 28 agosto de 2022.

THIND, P. S.; JOHN, S. Optimizing the Fenton based pre-treatment of landfill leachate using response surface methodology. **Journal of Water Chemistry and Technology**, v. 42, n. 4, p. 275-280, 2020. DOI: 10.3103/S1063455X2004013X.

TONELLOTO, M. L. Produção e caracterização do biogás produzido no aterro sanitário de Palmas, Tocantins. **TCC, IFTO**, 2019. Disponível em:<<http://www.ifto.edu.br/palmas/campus-palmas/ensino/biblioteca/Acervo/trabalhos-academicos/engenharia-civil/2019/luana-marinho-tonelloto.pdf/@@download/file/luana-marinho-tonelloto.pdf>>.