

Minérios estratégicos brasileiros em um estudo catalítico: ozonização fotocatalítica do corante rodamina B utilizando um nanocompósito de $\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$

Matheus Londero da Costa¹, Leandro Rodrigues Oviedo¹, Giovani Pavoski², Cristiane dos Santos³, Denise Crocce Romano Espinosa², Jorge Alberto Soares Tenório², Jivago Schumacher de Oliveira¹

¹Programa de Pós-Graduação em Nanociências, Universidade Franciscana (UFN), Santa Maria – RS, Brasil. E-mail: leandro.oviedo@ufn.edu.br; jivago@ufn.edu.br

²Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Extração (LAREX), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo – SP, Brasil. E-mail: giovanipavoski@gmail.com; espinosa@usp.br; jtenorio@usp.br

³Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – RS, Brasil. E-mail: cristiane.engbio@gmail.com

*autor correspondente: matheus.londero@ufn.edu.br

Resumo/Abstract

RESUMO – O presente trabalho investiga a aplicação de minérios estratégicos brasileiros na degradação do corante rodamina B (RhB) por ozonização fotocatalítica, utilizando um nanocatalisador $\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$ sintetizado com extrato vegetal e casca de arroz. A caracterização do material indicou estrutura mesoporosa, banda de lacuna reduzida e área superficial adequada para catálise. Os ensaios fotocatalíticos foram otimizados por planejamento experimental e com análise SHAP para ver a significância das variáveis, revelando que a melhor condição de remoção (98,18%) ocorreu com 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de RhB e 0,2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ de catalisador. O modelo de Langmuir-Hinshelwood descreveu bem a cinética de degradação com um R^2 de 0,996 e uma velocidade reacional máxima de 0,085 min^{-1} . Ensaios com capturadores revelaram a participação ativa de espécies reativas de oxigênio e lacunas. O compósito apresentou desempenho superior aos componentes isolados, demonstrando o potencial de aproveitamento sustentável de recursos nacionais em tecnologias ambientais avançadas.

Palavras-chave: Síntese verde, niobato de lítio, fotodegradação, resíduos agroindustriais.

ABSTRACT - This work investigates the application of Brazilian strategic minerals in the degradation of rhodamine B (RhB) dye by photocatalytic ozonation, using a $\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$ nanocatalyst synthesized with plant extract and rice husk. The characterization of the material indicated a mesoporous structure, reduced band gap energy (E_g), and adequate surface area (S_{BET}) for catalysis. The photocatalytic tests were optimized by experimental design and SHAP analysis to see the significance of the variables, revealing that the best removal condition (98.18%) occurred with 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of RhB and 0.2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of catalyst. The Langmuir-Hinshelwood model described well the degradation kinetics with an R^2 of 0.996 and a maximum reaction rate of 0.085 min^{-1} . Tests with scavengers revealed the active participation of reactive oxygen species and vacancies. The composite showed superior performance to isolated components, demonstrating the potential for sustainable use of national resources in advanced environmental technologies.

Keywords: Green synthesis, lithium niobate, photodegradation, agro-industrial waste.

Introdução

A rodamina B (RhB) é um corante xantênico utilizado em larga escala em indústrias têxteis, cosméticas e como marcador fluorescente em bioensaios (1), no entanto, devido à sua alta estabilidade química e potencial toxicidade, sua presença em efluentes industriais representa um sério risco ambiental, podendo causar efeitos mutagênicos e desequilíbrios em ecossistemas aquáticos (2). Além disso, técnicas convencionais de tratamento de água frequentemente falham na degradação completa desse poluente, gerando subprodutos persistentes (3).

Nesse cenário, os processos oxidativos avançados (POAs) emergem como alternativas eficientes, combinando oxidantes potentes como o ozônio (O_3), catalisadores e

irradiação luminosa para a degradação de compostos orgânicos (4). A fotocatalise heterogênea, em particular, tem sido amplamente investigada devido à capacidade de semicondutores metálicos de gerarem espécies reativas de oxigênio (ROS) sob luz UV/visível, promovendo a ruptura de moléculas orgânicas (5). Quando associada ao O_3 , que atua como um forte agente oxidante, a eficiência do processo pode ser significativamente amplificada devido à formação sinérgica de diferentes radicais gerados no meio (6) como $\cdot\text{O}_2^-$ que atuam na mineralização dos poluentes alvos.

Durante a 5ª conferência nacional de ciência, tecnologia e inovação (5CNCTI) realizada em 2024 foram definidos minérios estratégicos brasileiro para desenvolvimento de

tecnologias destacando o nióbio (Nb), lítio (Li) e silício (Si) (7). Assim, existe um potencial de desenvolvimento de tecnologias nacionais em volta desses elementos.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo sintetizar, caracterizar um nanocompósito com nanopartículas verdes ($\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$) e avaliar a fotocatalise do corante RhB por meio de um estudo cinético, processo reacional e geração de intermediários na presença do O_3 avaliando o que interfere na velocidade reacional.

Experimental

1. Síntese

1. 1. SiO_2

A SiO_2 foi utilizada como matriz para esse trabalho foi sintetizada usando 10 g de casca de arroz adicionando a uma solução de 200 mL de HCl (2 mol.L⁻¹) em agitação magnética a 60 °C e 150 rpm durante 1 hora, então o produto foi lavado com água destilada até o pH 7 e filtrado a vácuo, após o material foi calcinado a 600 °C com um aquecimento de 30 °C.min⁻¹ durante 4 horas para remover as impurezas da composição das cascas (8).

1. 2. Extrato vegetal

O extrato vegetal foi preparado a partir de cascas de *Citrus latifolia* que foram secas por 7 dias a 50 °C, após foram triturados em um moinho de facas, onde após foram 10 g da casca moída que foi levada para uma solução hidroalcolica contendo 80 mL de água destilada e 20 mL de etanol (92 %), onde permaneceu sob agitação magnética por 1,5 h a 70 °C (9).

1. 3. LiNbO_3

Para síntese das nanopartículas verdes foi utilizado 60 mL de extrato vegetal preparado anteriormente, onde foi pesado 1,59 g de LiCl (Sigma Aldrich, 99% P. A.) e 9,2 g de NbCl₅ (Sigma Aldrich, 99% P. A.) com uma razão 1,1:1 Li:Nb, o, o pH da solução foi ajustado entre 8 e 9 com hidróxido de amônia que permaneceu sob agitação magnética por 30 min a 80 °C, a rota escolhida foi a hidrotérmica utilizando um reator autoclave de aço inoxidável com um politetrafluoretileno (100 mL) onde o material foi condicionado e levado ao forno mufla a 180 °C por 36 h com um aquecimento de 3 °C.min⁻¹, por fim o material foi filtrado a vácuo e lavado, e retornou para a mufla para a estabilização do material para uma calcinação a 450 °C por 4 h com aquecimento de 3 °C.min⁻¹ (10).

1. 4. Nanocatalisador suportado $\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$

Para a síntese do nanocatalisador suportado em SiO_2 foi pesado 1,851 g do mesmo e 0,227 g de LiNbO_3 em uma razão molar de 5% onde foram colocados em 50 mL de água destilada onde foi deixado sob agitação magnética com aquecimento de 60 °C por 30 min após foi calcinado a 450 °C por 4 h com aquecimento de 3 °C.min⁻¹ (11).

2. Caracterização

A espectrofotometria no infravermelho com Transformada de Fourier com Refletância Total Atenuada (FTIR-ATR) foi utilizada para a identificação dos grupos funcionais presentes nas amostras em um espectrofotômetro PerkinElmer, no modo de transmitância, na faixa de 1500 a 400 cm⁻¹. As propriedades texturais área superficial específica (S_{BET}), volume de poros (V_p) e diâmetro de poros (D_p) foram determinadas por porosimetria de N_2 em um equipamento Gemini 2375. S_{BET} foi determinado pela equação de Brunauer-Emmett-Teller (Método BET). Já os valores de D_p e V_p foram determinados pela Equação de Barret-Johner-Halenda (Método BJH). A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado para avaliar aspectos morfológicos das amostras sintetizadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV JEOL, operando em 15 kV) (12).

3. Fotodegradação da RhB

3. 1. Delineamento do composto central rotacional (DCCR)

Para a análise estatística, será utilizado software *Statistica* 10 (versão 10) a fim de determinar as condições ideais de concentração do poluente e concentração do catalisador, empregando a metodologia DCCR e a análise das superfícies de resposta. Assim, para o DCCR será empregada 2 repetições (2^2), obtendo-se um conjunto de 10 experimentos. Para a execução do DCCR foram fixados as variáveis independentes e os limites mínimos e máximos para a RhB (5,86 – 34,14 mg.L⁻¹) e nanocatalisador suportado (Cat) (0,14 – 0,56 g.L⁻¹) (13). A análise de SHAP (SHapley Additive exPlanations) foi realizada no Python versão 3.11.12 para interpretar modelos preditivos complexos atribuindo a cada limite uma contribuição individual para a previsão de um modelo como dados de entrada foram fornecidos tempo da reação, vazão mássica de O_3 , concentração de Cat e RhB, enquanto para a saída foi utilizada a velocidade reacional (14).

3. 2. Ensaios de ozonização fotocatalítica

Os ensaios de fotocatalise foram realizados em uma caixa isolada de radiação externa, o volume utilizado do efluente

foi de 100 mL em um bquer de 600 mL como fonte de O₃ foi usado um gerador de O₃ (OzonAr®, modelo HomeO3) com uma vazão mássica de 375 mg.h⁻¹ de O₃ com uma lâmpada de luz visível (VIS) de 50 W 50/60 Hz 6500 K (Taschibra®) com agitação magnética 900 rpm, foi deixado 15 min para o processo de adsorção ocorrer após com acionamento da lâmpada e O₃ foram coletadas nos tempos de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 min cerca de 2 mL que foram levados para uma centrifuga para decantar o catalisador em 4500 rpm durante 5 min, após foram analisadas em espectrofotômetro UV-VIS com uma cubeta de quartzo em um comprimento de onda 556 nm.

3. 3. Estudos cinético

O modelo de Langmuir-Hinshelwood (L-H) é representado na Equação (1).

$$C = C_0 * e^{-k_1 * t} \quad (1)$$

Onde C é a concentração no tempo t e C₀ é a concentração inicial (mg.L⁻¹), k₁ é a velocidade reacional (min⁻¹) e t é tempo (min) (15). Para o estudo cinético foi variado a concentração da RhB em 2,5; 5; 10; 30 e 50 mg.L⁻¹ utilizando a melhor concentração de catalisador avaliado.

3. 4. Efeito dos capturadores na fotocatalise heterogênea

Para investigar o mecanismo do processo de ozonização catalítica, foi avaliado a presença de capturadores de radicais, buracos de valência e elétrons, utilizando 1 mmol de álcool isopropílico, dicromato de potássio, ácido ascórbico e Ácido etilenodiaminotetracético (EDTA). para 100 mL da solução contendo o efluente (16).

Resultados e Discussão

1. Caracterização

A tabela 1 apresenta os resultados de porosimetria de N₂ e do DRS.

Tabela 1. Características texturais e eletrônicas dos materiais.

Material	S _{BET} (m ² .g ⁻¹)	V _p (cm ³ .g ⁻¹)	D _p (nm)	E. g. (eV)
SiO ₂	320,0	0,43	5,4	3,0
LiNbO ₃	259,9	0,50	6,6	3,0
SiO ₂ /LiNbO ₃	286,9	0,39	5,3	2,7

Na tabela 1 podemos observar que com a adição do LiNbO₃ sobre a sua matriz (SiO₂) houve um aumento da sua S_{BET} em relação ao catalisador puro o que ajuda no processo

de catalise com uma maior área de contato, enquanto V_p e D_p houve uma diminuição devido a possível obstrução dos mesmos pelo LiNbO₃, todos os materiais se caracterizaram como materiais mesoporoso D_p de 2 a 50 nm (17), todos os materiais se caracterizam como semicondutores e com a adição do reforço sobre a matriz houve uma diminuição significativa do E. g. do material(18).

A figura 1 mostra a micrografia do material suportado enquanto na figura 2 podemos ver o FTIR-ATR das amostras.

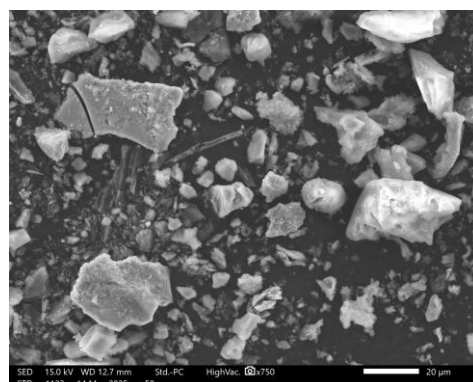


Figura 1. Micrografia de varredura eletrônica do SiO₂/LiNbO₃.

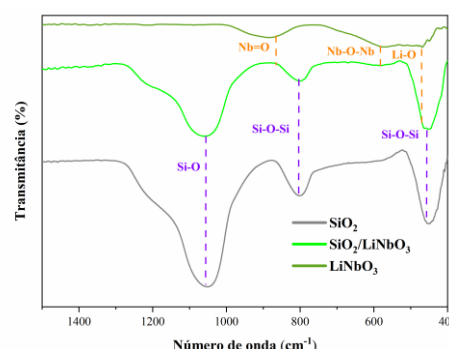
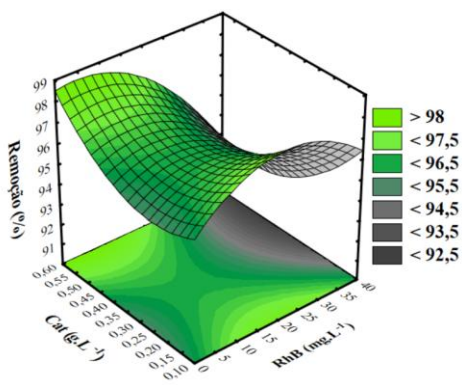


Figura 2. Espectro FTIR-ATR obtido da SiO₂, SiO₂/LiNbO₃ e LiNbO₃.

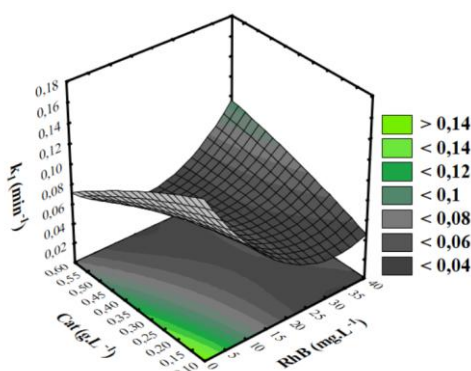
Na figura 1 vemos uma morfologia heterogênea e porosa, favorecendo a difusão intrapartícula das moléculas de RhB e, consequentemente, promovendo a remoção. Para figura 2 podemos observar s picos em 1050 cm⁻¹, 801 cm⁻¹ e 459 cm⁻¹ foram atribuídos à vibração de estiramento Si-O, alongamento simétrico Si-O-Si e curvatura Si-O-Si respectivamente (19), o que confirma a síntese de SiO₂. Enquanto para LiNbO₃ nota-se os grupos niobato que exibiram duas bandas em 860 cm⁻¹ e 585 cm⁻¹ devido às vibrações de alongamento de Nb=O e Nb-O-Nb. A bandas em de 477 cm⁻¹ é atribuída a vibrações específicas de ligações Li-O (20).

2. Delineamento do composto central rotacional

Na figura 3 podemos ver a superfície de resposta obtida pelo DCCR no presente estudo e na figura 4 os valores de SHAP.



(a)



(b)

Figura 3. Superfície de resposta obtida no DCCR com as respostas (a) a remoção da RhB e (b) a velocidade reacional.

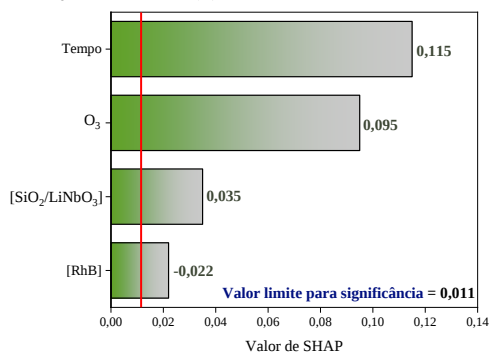


Figura 4. Variáveis obtidas que interferem no processo de ozonização fotocatalítica obtido via valores de SHAP.

Na figura 3 (a) foi possível observar possuímos duas zonas com maior taxa de remoção com 10 g.L⁻¹ de Cat numa faixa de 5 a 35 mg.L⁻¹ de RhB e de 0,5 a 0,6 g.L⁻¹ de Cat numa faixa de 5 a 20 mg.L⁻¹ RhB indicando que possui faixas que um excesso de radicais no meio em comparação

ao número de moléculas do corante ou de sítios ativos do Cat pode ser conflitantes diminuindo a eficiência da fotodegradação (21) e para a velocidade reacional (b) o processo mais rápido utilizando de 0,1 a 0,3 g.L⁻¹ de Cat com 5 mg.L⁻¹ de RhB, assim tanto para a remoção (98,18 %) quanto a velocidade cinética de forma não linear (0,093 min⁻¹) a melhor condição foi utilizando 10 mg.L⁻¹ de RhB com 0,2 g.L⁻¹ de Cat. Na figura 4 foi possível ver que todas as variáveis de todas as variáveis independentes (ou de entrada) foram significativas para a predição da velocidade reacional, com O₃, tempo, [SiO₂/LiNbO₃] apresentando influência direta positiva e [RhB] apresentando influência negativa indireta no processo de degradação fotocatalítica.

3. Condição ideal

3.1. Efeito da combinação dos materiais

A figura 5 apresenta o comportamento da degradação dos materiais sozinhos e combinados.

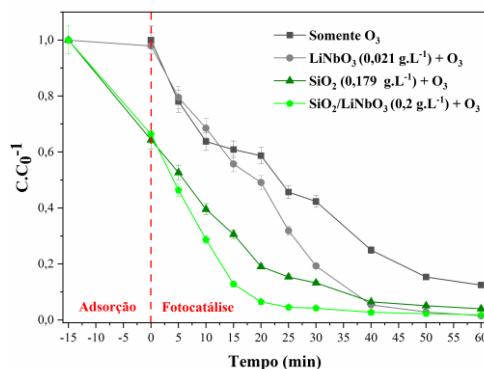


Figura 5. Estudo dos materiais envolvidos na melhor condição do DCCR, avaliando os materiais sozinhos e na forma de composto SiO₂/LiNbO₃ na relação 5% molar.

Com a figura 5 é possível notar que o O₃, SiO₂ e LiNbO₃ sozinhos não conseguem degradar o corante por total, mas quando combinados utilizando 0,2 g.L⁻¹ do nanocatalisador suportado é capaz de aumentar significativamente o processo de fotodegradação da RhB utilizando pouca fase ativa (LiNbO₃).

3. 2. Estudo cinético

A tabela 2 mostra os parâmetros obtidos no estudo cinético a partir da condição ideal utilizando 0,2 g.L⁻¹ de Cat e 375 mg.h⁻¹ de O₃ e a figura 6 ilustra o ajuste cinético para o modelo de L-H.

Tabela 2. Parâmetros cinéticos obtidos.

	Concentração de RhB (mg.L ⁻¹)				
	2,5	5	10	30	50
Remoção (%)	95,17	90,44	98,18	96,46	77,89
k ₁ (min ⁻¹)	0,069	0,045	0,085	0,060	0,023
R ²	0,824	0,969	0,929	0,993	0,996

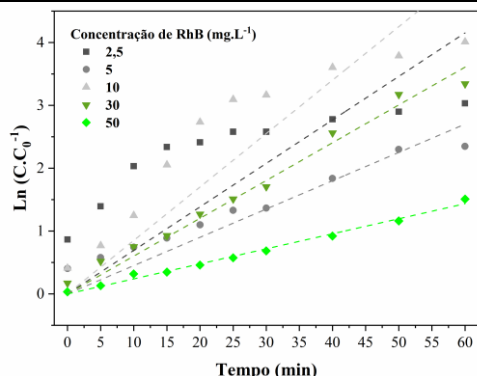


Figura 6. Estudo cinético utilizando o modelo de L-H para degradação do corante RhB utilizando 0,2 g.L⁻¹ de SiO₂/LiNbO₃ com uma vazão de 375 mg.h⁻¹ de O₃.

Na tabela 2 foi possível ver que a melhor remoção e velocidade reacional 98,18% e 0,085 min⁻¹ respectivamente foi na concentração de 10 mg.L⁻¹ de RhB por outro lado a concentração de 50 mg.L⁻¹ foi o que teve melhor ajuste para L-H como é possível visualizar na figura 6.

4. Efeito dos capturadores

Na figura 7 podemos observar o efeito dos capturadores na fotocatalise na melhor condição.

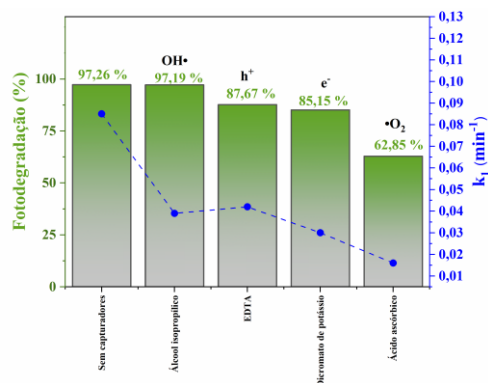


Figura 7. Efeito dos capturadores no processo de fotodegradação de 10 mg.L⁻¹ da RhB utilizando 0,2 g.L⁻¹ de SiO₂/LiNbO₃ com uma vazão de 375 mg.h⁻¹ de O₃.

Na figura 7 podemos ver o radical mais presente processo de ozonização fotocatalítica é o •O₂⁻ isso possivelmente se deve a fácil/rápida dissociação da própria molécula de O₃.

Conclusões

Portanto o presente trabalho foi possível verificar mudanças texturais e eletrônica com a adição do LiNbO₃ como reforço na SiO₂ apresentando uma alta área superficial de 286 m².g⁻¹, além disso a combinação dos materiais em conjunto aumentaram significativamente a fotodegradação da RhB atingindo uma remoção máxima de 98,18% na melhor condição com 0,2 g.L⁻¹ de SiO₂/LiNbO₃, para o modelo de L-H a concentração com o melhor ajuste foi com 50 mg.L⁻¹ de RhB com um R² de 0,996, além disso o radical O₂⁻ se mostrou o mais importante para essa reação. Por conseguinte, o presente trabalho apresentou uma alternativa amigável ao meio ambiente por via de síntese verde e reaproveitamento de resíduos agroindustriais, além de valorizar minérios estratégicos nacionais o que pode tornar esse material como um catalisador potencial para avanço da economia brasileira.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – PROSUC – Código de Financiamento 001) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq/MCTI/FNDCT nº 23/2022) - InovaNióbio (nº 408422/2022-0).

Referências

- Priya, P. S.; Nandhini, P. P.; Vaishnavi, S.; Pavithra, V.; Almutairi, M. H.; Almutairi, B. O.; et al. Rhodamine B, an organic environmental pollutant induces reproductive toxicity in parental and teratogenicity in F1 generation in vivo. *Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol.* **2024**, *280*, 109898–109910.
- Yang, J.; Han, Y.; Sun, Z.; Zhao, X.; Chen, F.; Wu, T.; et al. PEG/Sodium Tripolyphosphate-Modified Chitosan/Activated Carbon Membrane for Rhodamine B Removal. *ACS Omega* **2021**, *6*(24), 15885–15891.
- Liang, L.; Cheng, L.; Zhang, Y.; Wang, Q.; Wu, Q.; Xue, Y.; et al. Efficiency and mechanisms of rhodamine B degradation in Fenton-like systems based on zero-valent iron. *RSC Adv.* **2020**, *10*(48), 28509–28515.
- Satyam, S.; Patra, S. The Evolving Landscape of Advanced Oxidation Processes in Wastewater Treatment: Challenges and Recent Innovations. *Processes* **2025**, *13*(4), 987–1015.

5. Wang, H.; Li, X.; Zhao, X.; Li, C.; Song, X.; Zhang, P.; et al. A review on heterogeneous photocatalysis for environmental remediation: From semiconductors to modification strategies. *Chinese J. Catal.* **2022**, *43*(2), 178–214.
6. Guerra-Rodríguez, S.; Rodríguez, E.; Rodríguez-Chueca, J. Pilot-scale regeneration of wastewater through intensified sulfate radical-based advanced oxidation processes (PMS/UV-A, PMS/H₂O₂/UV-A, and PMS/O₃): Inactivation of bacteria and mechanistic considerations. *Chem. Eng. J.* **2023**, *469*, 143859–143869.
7. Peregrino, F. A Finep e a neoindustrialização: uma contribuição à V CNCTI, Ed.; *Expressão Popular*, **2024**; Vol. 1, 1-216.
8. Oviedo, L. R.; Muraro, P. C. L.; Pavoski, G.; Espinosa, D. C. R.; Ruiz, Y. P. M.; Galembeck, A.; et al. Synthesis and characterization of nanozeolite from (agro)industrial waste for application in heterogeneous photocatalysis. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2022**, *29*(3), 3794–3807.
9. Jiang, H.; Zhang, W.; Xu, Y.; Chen, L.; Cao, J.; Jiang, W. An advance on nutritional profile, phytochemical profile, nutraceutical properties, and potential industrial applications of lemon peels: A comprehensive review. *Trends Food Sci. Technol.* **2022**, *124*, 219–236.
10. Tian, X.; Qi, Q.; Hou, B.; Qian, Y. Hydrothermal synthesis and upconversion luminescence of cubic-shaped LiNbO₃:Yb³⁺/Er³⁺ nanocrystals. *Inorg. Chem. Commun.* **2023**, *157*, 111389–111397.
11. Morales-Saavedra, O. G.; Chavira, E. Synthesis-dependent structural and optoelectronic properties of semicrystalline LiNbO₃:SiO₂ hybrid silicates. *Opt. Mater.* **2023**, *142*, 113930–113954.
12. Brum, L. F. W.; Da Silva, M. D. C. R.; Dos Santos, C.; Pavoski, G.; Espinosa, D. C. R.; Da Silva, W. L. Green synthesis of niobium (V) oxide nanoparticles using pecan nutshell (*Carya illinoensis*) and evaluation of its antioxidant activity. *Catal. Today* **2025**, *445*, 115106–115109.
13. Samoila, P.; Cojocaru, C.; Mahu, E.; Ignat, M.; Harabagiu, V. Boosting catalytic wet-peroxide-oxidation performances of cobalt ferrite by doping with lanthanides for organic pollutants degradation. *J. Environ. Chem. Eng.* **2021**, *9*(1), 104961–104971.
14. Schossler, R. T.; Ojo, S.; Jiang, Z.; Hu, J.; Yu, X. A novel interpretable machine learning model approach for the prediction of TiO₂ photocatalytic degradation of air contaminants. *Sci. Rep.* **2024**, *14*(1), 13070–13084.
15. Cho, Y.-S.; Nguyen, H. H.; Nguyen, T. T. H. Modeling of slurry-type photocatalytic reactors containing core-shell particles for predicting transient behaviours based on Langmuir-Hinshelwood kinetics. *Catal. Today* **2023**, *411–412*, 113909.
16. Girish, Y. R.; Udayabhanu; Byrappa, N. M.; Alnaggar, G.; Hezam, A.; Nagaraju, G.; et al. Rapid and facile synthesis of Z-scheme ZnO/g-C₃N₄ heterostructure as efficient visible light-driven photocatalysts for dye degradation and hydrogen evolution reaction. *J. Hazard Mater. Adv.* **2023**, *9*, 100230–100239.
17. Emrie, D. B. Sol-Gel Synthesis of Nanostructured Mesoporous Silica Powder and Thin Films. *Journal of Nanomaterials* **2024**, *2024*, 1–16.
18. Nyankson, E.; Efavi, J. K.; Agyei-Tuffour, B.; Manu, G. Synthesis of TiO₂-Ag₃PO₄ photocatalyst material with high adsorption capacity and photocatalytic activity: application in the removal of dyes and pesticides. *RSC Adv.* **2021**, *11*(28), 17032–17045.
19. El Messaoudi, N.; El Khomri, M.; Ablouh, E.-H.; Bouich, A.; Lacherai, A.; Jada, A.; et al. Biosynthesis of SiO₂ nanoparticles using extract of Nerium oleander leaves for the removal of tetracycline antibiotic. *Chemosphere* **2022**, *287*, 132453–132462.
20. Kashif, I.; Soliman, A. A.; Sakr, E. M.; Ratep, A. XRD and FTIR studies the effect of heat treatment and doping the transition metal oxide on LiNbO₃ and LiNb₃O₈ nano-crystallite phases in lithium borate glass system. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2013**, *113*, 15–21.
21. Kwon, Y.; Lee, J.; Noh, Y.; Kim, D.; Lee, Y.; Yu, C.; et al. Formation and degradation of strongly reducing cyanoarene-based radical anions towards efficient radical anion-mediated photoredox catalysis. *Nat. Commun.* **2023**, *14*(1), 92–107.