

## Síntese verde, caracterização e aplicação de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na degradação fotocatalítica de norfloxacina

Mayara N. Linhares<sup>1\*</sup>, Camila C. Morais<sup>1</sup>, Samuel F. P. Bessa<sup>1</sup>, Cynthia C. Albuquerque<sup>1</sup>, Keurison F. Magalhães<sup>1</sup>, Suely S. L. Castro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Eletroquímica e Química Analítica, Departamento de Química, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, CEP 59625-620, Mossoró, RN, Brasil.

[mayaralinhares@alu.uern.br](mailto:mayaralinhares@alu.uern.br)\*

### Resumo/Abstract

**RESUMO** - Neste trabalho foi utilizado a síntese verde com extrato de folhas de *Lippia grata* para produzir nanopartículas de óxido de ferro (NPOFe) estáveis para aplicação na degradação fotocatalítica de norfloxacina. Foi usado o método de combustão em solução, em que os extratos de *Lippia* foram utilizados como biocombustível e cloreto férrico como precursor do metal e oxidante. Os materiais produzidos foram caracterizados usando técnicas de DRX, que possibilitou identificar o catalisador como sendo a hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); e de ERD, que permitiu estimar os valores de *band gap* (2,8 a 3,7). As NPOFe sintetizadas foram aplicadas na degradação do fármaco, possibilitando uma remoção de 32,6%, indicando que o material produzido tem potencial para uso em fotocatalise. Em suma, a síntese verde mostrou-se versátil para a produção sustentável de  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e as NPOFe mostraram-se promissoras na degradação de norfloxacina.

*Palavras-chave:* Óxido de ferro, extrato de *Lippia grata*, processos oxidativos avançados, degradação de norfloxacina.

**ABSTRACT** - In this work, green synthesis with *Lippia grata* leaf extract was used to produce stable iron oxide nanoparticles (NPOFe) for application in the photocatalytic degradation of norfloxacin. The solution combustion method was used, in which *Lippia* extracts were used as biofuel and ferric chloride as the metal precursor and oxidant. The materials produced were characterized using XRD techniques, which allowed the identification of the catalyst as hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); and ERD, which allowed the estimation of the band gap values (2.8 to 3.7). The synthesized NPOFe were applied in the degradation of the drug, enabling a removal of 32.6%, indicating that the produced material has potential for use in photocatalysis. In summary, green synthesis proved to be versatile for the sustainable production of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and NPOFe showed promise in the degradation of norfloxacin.

*Keywords:* Iron oxide, *Lippia grata* extract, advanced oxidative processes, norfloxacin degradation.

## Introdução

Nos últimos anos, a síntese de nanopartículas de óxido de ferro (NPOFe) tem se destacado em razão das suas propriedades especiais e das diversas aplicações que esse material possui. Entre estas, as NPOFe têm grande potencial para absorver diferentes tipos de contaminantes presentes no meio ambiente, como corantes, antibióticos e outros poluentes orgânicos, além de poder degradá-los de forma eficiente por meio de processos Fenton, fotocatalíticos e outros (1,2).

A magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) e hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) são os óxidos de ferro que mais têm despertado interesse, pois eles apresentam baixa toxicidade, alta capacidade de absorção, grande reatividade na superfície, boas propriedades elétricas e magnéticas, além de serem eficientes como catalisadores. Essas características se devem à biocompatibilidade, ao superparamagnetismo e ao tamanho nanométrico dessas partículas. Por essa razão, os nanomateriais à base de ferro atuam como catalisadores eficientes na remoção de poluentes, principalmente na presença de luz visível ou ultravioleta (3-5).

Diferentes métodos têm sido utilizados para sintetizar essas nanopartículas e os que utilizam práticas de química verde são especialmente importantes e têm sido o foco de investigações de vários pesquisadores (6,7). A Síntese Verde é um método eficiente para produzir nanopartículas de forma mais sustentável, utilizando agentes redutores e quelantes que tenham baixa ou nenhuma toxicidade, substituindo os reagentes químicos tradicionais por extratos de plantas. Esses extratos contêm moléculas redutoras que ajudam a transformar íons metálicos em nanopartículas ou que auxiliam na estabilização e no revestimento de óxidos metálicos (8,9). Por esta razão, extratos de plantas têm sido utilizados como biocombustíveis em sínteses por combustão em solução, um método simples, rápido, eficiente, de custo baixo e conveniente de preparar fotocatalisadores verdes.

Para os processos de biossíntese de fotocatalisadores podem ser utilizadas raízes, folhas, sementes, flores, frutos, cascas, pétalas, planta inteira e casca de sementes, pois são ricas em diversas biomoléculas como carboidratos, aminoácidos, flavonóides, proteínas, saponinas, terpenóides e compostos nitrogenados que funcionam como redutores, estabilizadores, mediadores redox e agentes de funcionalização na síntese de nanopartículas (10). Portanto, os extratos dos gêneros *Lippia*, da família *Verbenaceae*, que contém compostos secundários como flavonóides, iridóides e naftoquinonas (11), e que são facilmente encontradas na caatinga, podem ser opções vantajosas para a biossíntese das NPOFe para aplicação na degradação de contaminantes,

sendo um caminho promissor para remediação de águas contaminadas, de forma sustentável.

A poluição dos recursos hídricos, como rios e lagos, tem aumentado significativamente, especialmente devido aos chamados poluentes emergentes, como os fármacos, que têm sido encontrados com frequência nos corpos d'água (12). Entre estes, antibióticos como a norfloxacin, que tem largo espectro de ação para bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, vêm ganhando atenção em virtude do aumento na sua produção e do uso tanto para humanos quanto veterinário. Como consequência, esses compostos são frequentemente detectados nas estações de tratamento de água (12).

Neste trabalho, NPOFe foram sintetizadas por meio do método de reação de combustão em solução usando extrato de folhas de *Lippia grata* como biocombustível e aplicadas na degradação do antibiótico norfloxacin.

## Experimental

### *Reagentes e soluções*

Todos os reagentes e soluções utilizados foram de grau analítico e para a preparação das soluções e amostras foi usado água pura ( $\rho \geq 18 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$ , Milli-Q Advantage, Millipore).

### *Coleta e processamento das folhas de Lippia grata*

As folhas das plantas foram coletadas no dia 17 de maio de 2024 na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, durante o período matutino, e levadas até o Laboratório de Eletroquímica e Química Analítica. Após coletadas, as folhas foram lavadas em água corrente seguido de água destilada, secas ao ar livre por 48 horas e em estufa com circulação forçada de ar por 72 horas à 40 °C e trituradas em liquidificador industrial. O material foi armazenado em dessecador e ao abrigo da luz para evitar possíveis problemas com a fotodegradação de compostos orgânicos.

### *Preparação do extrato de Lippia grata*

Para a extração dos compostos ativos, 10 g de folhas moídas foram misturadas em 200 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  e mantidas em repouso por 2 horas. Após o tempo de extração, a solução foi filtrada em papel filtro qualitativo, transferidas para frascos âmbar e mantidas em refrigerador a 4 °C na ausência de luz.

### *Teste fitoquímico do extrato aquoso da Lippia grata*

Para a identificação dos metabólitos secundários foi realizado o teste fitoquímico, adaptado por Kloss et al. (13); os testes foram realizados em tubos de ensaio enumerados contendo o extrato. Para os alcalóides, em 2

mL de extrato aquoso foram adicionados 2 mL de ácido clorídrico (10%) e, em seguida, a mistura foi aquecida por 10 minutos em banho maria. Após o resfriamento foram adicionadas, em cada tubo, 3 gotas dos seguintes reagentes: Mayer, Wagner e Dragendorff. Para o teste de flavonoides, colocou-se no tubo de ensaio 5 mL do extrato aquoso e adicionou-se 3 gotas da solução de cloreto férrico (2%). Para as saponinas utilizou-se 2 mL do extrato aquoso e 5 mL de H<sub>2</sub>O e a solução resultante foi colocada em banho maria por 10 minutos. Para os taninos utilizou-se 2 mL do extrato aquoso e adicionou-se 2 gotas da solução de cloreto férrico (2%).

#### *Síntese e caracterização das nanopartículas sintetizadas*

Os óxidos de ferro nanoestruturados foram sintetizados via síntese por combustão em solução. Diferentes proporções de extrato aquoso puro, utilizado como biocombustível, e solução salina precursora oxidante de cloreto férrico hexahidratado (FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O) foram avaliadas para a produção das NPOFe. As misturas foram colocadas para aquecer dentro de uma capela, devido aos gases que são liberados durante o processo de síntese; as temperaturas utilizadas variaram entre 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C e 500 °C, mantendo-se 10 minutos em cada temperatura. A última temperatura foi mantida até que cessasse a liberação de gases e toda a água fosse evaporada, finalizando a síntese. Os materiais sintetizados foram macerados e calcinados em forno mufla a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min até chegar à 700 °C, que foi mantida por 2 h. Também foram sintetizadas amostras em diferentes temperaturas de calcinação (500 °C durante 2 h e 1000 °C por 30 min).

Os materiais obtidos foram caracterizados por Difração de Raios X (DRX) utilizando Difrátômetro AXRD Proto e Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) utilizando um Espectrofotômetro UV-Visível Cary 4000.

#### *Aplicação fotocatalítica do $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*

Os testes de degradação fotocatalítica foram realizados em uma célula encamisada para refrigeração (com recirculação de água) contendo 20 ppm de Norfloxacin e o fotocatalisador sintetizado (NPOFe), em 200 mL de solução aquosa, mantida sob agitação magnética e irradiação de uma lâmpada de vapor de mercúrio sem o bulbo de 80 W (Phillips). Durante os experimentos de degradação foram retiradas alíquotas em tempos pré-determinados para análises de pH, condutividade, temperatura e de espectrofotometria de UV-visível para o monitoramento do processo. Foi utilizado um espectrofotômetro UV-VIS Cary 50 (Varian) e os espectros foram registrados na faixa de 200 a 800 nm.

Para os testes de adsorção foi utilizado o mesmo sistema, mas sem ligar a lâmpada; e para os testes de fotólise, usados para fins de comparação, não foi adicio-

nado as NPOFe na célula.

## Resultados e Discussão

### *Teste fitoquímico do extrato aquoso de *Lippia grata**

Os testes fitoquímicos são importantes para identificar as classes de metabólitos secundários presentes no extrato aquoso da *Lippia grata*, especialmente na reação de combustão em solução, visto que eles possuem grupos funcionais que auxiliam no processo de oxirredução (14) (15) e ainda atuam como complexantes (16), melhorando a estabilidade, além de contribuírem para o controle do tamanho e da morfologia das nanopartículas (17). Por meio desses testes foi possível confirmar a presença de flavonoides, taninos, alcaloides e saponinas no extrato analisado. Os flavonoides e taninos foram identificados pela formação de uma coloração verde escuro após adição de cloreto férrico 2%, que é indicativo da presença desses compostos. Já os alcaloides foram identificados com maior clareza pelo reagente de Dragendorff, que formou um precipitado vermelho. Quanto às saponinas, sua presença foi confirmada pela formação de espuma após aquecimento e agitação com água.

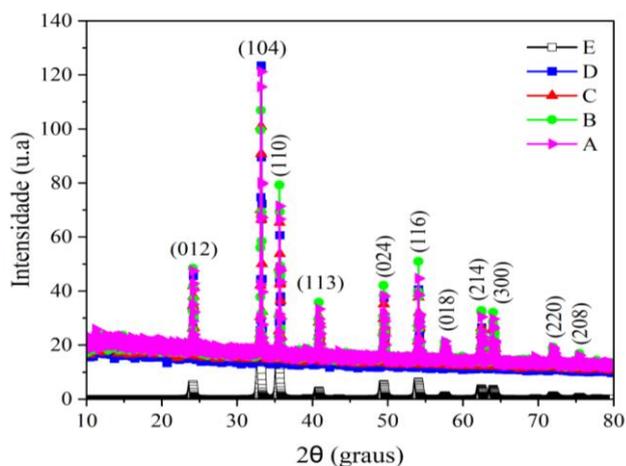
### *Caracterização das NPOFe por DRX*

Os difratogramas de raios-x dos fotocatalisadores produzidos em diferentes proporções combustível-oxidante são apresentados na Figura 1, onde podem ser comparados os resultados de análise de três amostras de NPOFe preparadas nas seguintes proporções de oxidante (sal precursor, SP) e combustível (extrato puro da planta, EP), totalizando 40 mL: A) 20 mL de SP + mistura de 15 mL de EP com 5 mL de água; B) 20 mL de SP + mistura de 10 mL de EP com 10 mL de água; e C) 20 mL de SP + 20 mL de EP. Para fins de comparação, as NPOFe também foram sintetizadas utilizando um volume menor de solução (30 mL): 15 mL de SP + 15 mL de EP (D). Estas amostras foram calcinadas a 700 °C. A carta cristalográfica apresentada (E) corresponde à fase cristalina da hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Observa-se que todos os difratogramas de raios-x apresentaram picos bem definidos e com valores de 2 $\theta$  que correspondem ao padrão da hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), indicando a sua formação em todos os casos. Porém, foi observado que os materiais formados usando o extrato vegetal puro, sem diluição (C e D), apresentaram picos de difração levemente menos intensos; enquanto que as amostras sintetizadas com extratos mais diluídos (composições A e B) mostraram picos mais intensos, indicando a obtenção de hematitas com maior cristalinidade (18,19). Estes resultados mostram que a proporção entre o extrato vegetal e o precursor é relevante na produção do óxido metálico e que a síntese verde é um método flexível para produzir materiais com

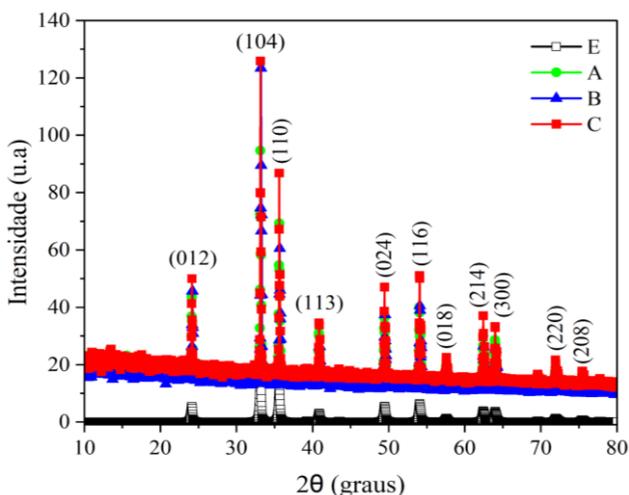
propriedades que podem ser ajustadas conforme a necessidade.

**Figura 1.** Difratomogramas de raios-x das NPOFe sintetizadas a partir do extrato de *Lippia grata* (A, B, C e D) e carta cristalográfica da hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (E).



Para avaliar o efeito da temperatura de calcinação, as NPOFe foram sintetizadas usando o mesmo procedimento experimental, mas calcinadas em temperaturas diferentes. A Figura 2 mostra os difratogramas de raios-x registrados com as amostras sintetizadas na proporção de 15 mL de EP e 15 mL de SP e calcinadas à 500 °C (A), 700 °C (B) e 1000 °C (C).

**Figura 2.** Difratomogramas de raios-x das NPOFe calcinadas nas temperaturas de A) 500 °C, B) 700 °C e C) 1000°C. E) corresponde ao difratograma da carta cristalográfica.



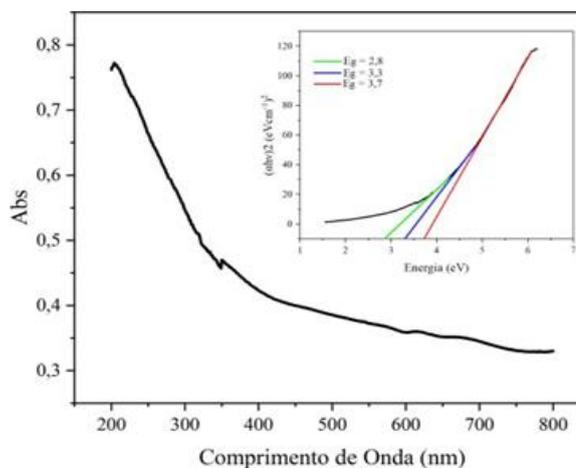
A comparação dos difratogramas mostra que a hematita foi produzida em todas as temperaturas, conforme carta cristalográfica (D), porém, os picos mais intensos, indi-

cando maior cristalinidade (20), foram obtidos com as amostras calcinadas a 1000 °C (C). A amostra calcinada a 500 °C (A), que apresentou picos de menor intensidade, pode apresentar fases amorfas ou precursores não completamente removidos, indicando que esta temperatura não é adequada para a formação da hematita com boa cristalinidade (21).

#### Caracterização das NPOFe por ERD

A Figura 3 mostra o espectro de absorção UV-visível para as NPOFe sintetizadas com 15 mL de EP e 15 mL de SP e calcinação à 1000 °C, obtido por espectroscopia de reflectância difusa e *band gap* estimado a partir da relação de Tauc. Os resultados mostram que o material absorve fortemente na região ultravioleta, atingindo o seu pico próximo de 200 nm e diminuindo até cerca de 400 nm, se estabilizando na região do visível. Isso indica que o material é eficiente em absorver luz de alta energia.

**Figura 3.** Espectro de absorção UV-visível das NPOFe amostra D) e curva de Tauc correspondente.



A presença dos três pontos de *band gap* sugere que o comportamento eletrônico do material é bastante complexo. O tratamento térmico a 1000 °C pode ter causado recristalização, formação de fases diferentes ou introdução de defeitos de oxigênio, que são conhecidos por criar estados intermediários na banda proibida (22). Essas alterações favorecem múltiplos caminhos de transição para os elétrons, o que explica os diferentes valores de *Eg* observados. Valores de *band gap* acima de 3,5 eV indica que o material pode absorver luz UV profunda, o que pode ser útil em aplicações em degradação fotocatalítica de contaminantes, mas também em sensores UV (23).

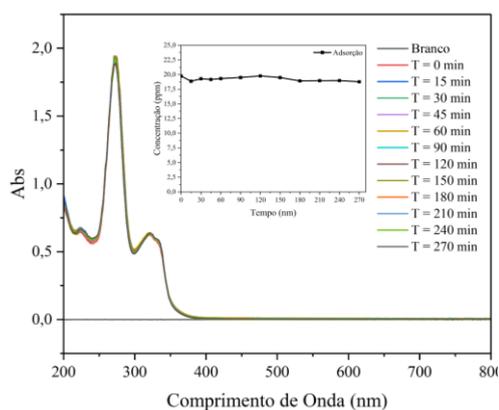
#### Fotodegradação da norfloxacin

Os estudos apresentados acima mostraram que, independentemente das temperaturas de calcinação e das

proporções de EP-SP utilizadas, as posições dos picos não foram alteradas, indicando uma boa estabilidade das hematitas produzidas. Por outro lado, em relação a cristalinidade, indicada pela intensidade dos picos, foram observadas diferenças significativas. Segundo Ulfa et al., o aumento da cristalinidade pode causar redução na área superficial do material, diminuindo a sua porosidade e os sítios catalíticos disponíveis; conseqüentemente, prejudicando o seu desempenho fotocatalítico (24). Por esta razão, estudos fotocatalíticos de degradação do antibiótico norfloxacin foram realizados durante 240 min usando hematita com diferentes cristalinidades, para fins de comparação.

A Figura 4 mostra os espectros de absorção UV-Visível de uma amostra de NPOFe sintetizada com 15 mL de EP (extrato puro) e 15 mL de SP, calcinada à 1000 °C. Pode-se notar o espectro típico do fármaco, com uma banda de absorção bem intensa em 270 nm, comum em transições eletrônicas  $\pi-\pi^*$ , relacionada às estruturas aromáticas. Os espectros registrados na ausência de luz, em diferentes tempos de experimento, se sobrepõem, indicando que o catalisador permaneceu estável durante todo o período, sem mudanças relevantes na sua estrutura eletrônica, e demonstrando que o equilíbrio de adsorção/dessorção do fármaco nas nanopartículas foi obtido já nos primeiros minutos (Inserção da Figura 4).

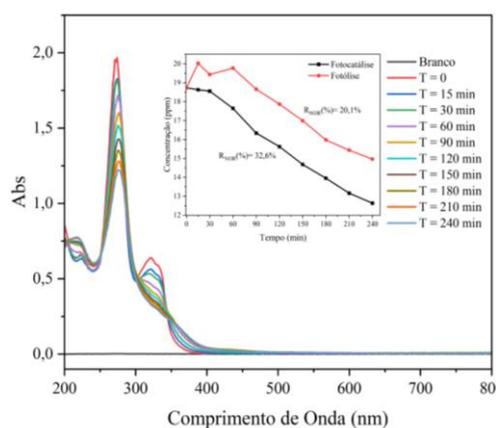
**Figura 4.** Espectros de absorção obtidos durante o teste de adsorção de 20 ppm de norfloxacin em 500 ppm de NPOFe (amostra D calcinada a 1000 °C).



O processo de degradação fotocatalítica da norfloxacin, usando esse fotocatalisador ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) sintetizado, foi monitorado ao longo de 240 minutos por espectrofotometria UV-visível. Os espectros de absorção registrados são apresentados na Figura 5 e mostram um decréscimo das bandas de absorção em função do tempo de fotocatalise, indicando a degradação do fármaco; neste processo, a hematita absorve luz e produz espécies químicas reativas capazes de oxidar a norfloxacin (25).

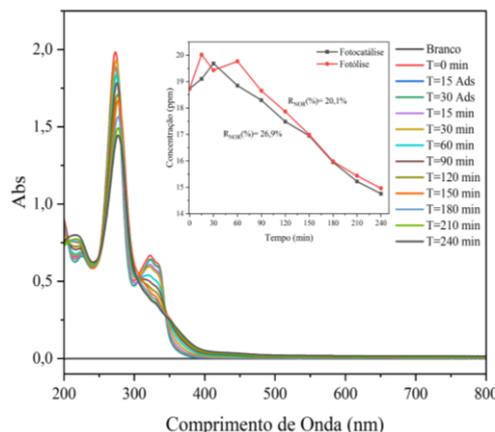
A influência do fotocatalisador na degradação da norfloxacin também pode ser verificada quando se compara o decréscimo da concentração do fármaco durante a fotocatalise (32,6%) com o obtido durante a fotólise (20,1%) após 240 min de experimento (Inserção na Figura 5).

**Figura 5.** Espectros de absorção UV-Visível da norfloxacin 20 ppm, registrados em diferentes tempos de fotocatalise, usando 500 ppm do catalisador D.



Para fins de comparação, a Figura 6 mostra os espectros de absorção UV-Vis da norfloxacin submetida ao processo de fotocatalise usando 500 ppm do catalisador B (sintetizado com extrato diluído). Na inserção da Figura 6 é apresentada a comparação dos processos de fotocatalise e fotólise. Como pode ser observado, essa fotocatalise promoveu uma redução de 26,9% na concentração do fármaco, após 240 minutos de tratamento; uma eficiência de degradação menor, embora a hematita tenha apresentado maior cristalinidade. Estes resultados estão em concordância com o reportado por Ulfa et al. (24).

**Figura 6.** Espectros de absorção UV-Visível da norfloxacin 20 ppm, registrados em diferentes tempos de fotocatalise, usando 500 ppm do catalisador B.



## Conclusões

A síntese verde usando o método de combustão em solução mostrou-se bastante versátil para a produção de óxido de ferro na fase hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), além de fornecer propriedades fotocatalíticas ao material, que promovem a degradação do antibiótico norfloxacinol sob irradiação UV-visível.

A posição inalterada dos picos nos difratogramas indicou grande estabilidade da hematita sintetizada por esse método de síntese, porém, diferenças na cristalinidade do material foram observadas quando diferentes proporções de EP-SP e temperaturas de calcinação foram utilizadas.

A maior porcentagem de remoção do fármaco (32,6%) foi obtida com uma hematita de cristalinidade intermediária, que foi obtida com 15 mL de SP + 15 mL de EP (amostra D), calcinada a 1000 °C.

## Agradecimentos

Agradecemos à CAPES (código de financiamento 001) pela bolsa de mestrado e ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida; ao CSAMA/UERN pelas análises de DRX das amostras; e à UERN pela oportunidade de realização do trabalho.

## Referências

- R. Selvaraj; S. Pai; R. Vinayagam; T. Varadavenkatesan, P. S. Kumar; P. A. Duc; G. Rangasamy. *Chemosphere*, **2022**, 308, 136-331.
- L. M. Kustov; E. M. Kostyukhin; E. Yu. Korneeva; A. L. Kustov. *Russian Chemical Bulletin*, **2023**, 72(3) 583-601.
- L. M. Darabian; G. R. Gonçalves; M. A. Schettino Jr; E. C. Passamani; J.C.C. Freitas. *Materials Chemistry and Physics*, **2022**, 285, 126-065.
- R. Kumar, R. Choudhary, OP Pandey, K. Singh; P. Bhargava. *Glass Physics and Chemistry*, **2023**, 49(1) 63-68.
- R. Revathy; T. Sajini; C. Agostinho; N. José. *Results in Engineering*, **2023**, 18, 101-114.
- L. M. de Souza; P. S.S. Porto; E. P. Muniz. *Research, Society and Development*, **2019**, 8(1), 01-17.
- N. Priya; K. Kaur; A. K. Sidhu. *Front. Nanotechnol.* **2021**.
- A. Dzimitrowicz; G. C. diCenzo; P. Swatek; P. Cyganowski; A. Stencel; D. Pogoda; P. Jamroz; P. Pohl. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **2018**, 480.
- R. S. Melo; F. C. Silva; K. R. M. Moura; A. S. de Menezes; F. S. M. Sinfrônio. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **2015**, 381,109–115.
- P. Mondal; A. Anweshan; M.K. Purkait, *Chemosphere*, **2020**, 259, 127509.
- C.C. Albuquerque; et al. *Braz Arch Biol Techn.* **2006**, 49 (4), 527.
- C.C. montager; C. Vidal; R. D. Acayaba. *Química Nova*, **2017**, 40(9), 1094-1110.
- Kloss; A. M. Albino; R. G. Souza; R. A. Lima. *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*, **2016**, 3(2), 118-128.
- R. S. Varma. *Current Opinion in Chemical Engineering*, **2014**, 6, 36-43.
- W. Y. Teoh; R. Amal; A. F. Masters; T. Maschmeyer. *Journal of Materials Chemistry*, **2011**, 21, 9994–10012.
- J. Sinhg; T. Dutta; K. Kim; M. Rawat; P. Samddar P. Kumar. *Journal of Nanobiotechnology*, **2018**, 16(1), 84.
- S. Iravani. *Green Chemistry*, **2011**, 13, 2638–2650.
- M. H. Zahir; M. J. Nasir; M. A. Hassan. *Alexandria Engineering Journal*, **2016**, 55(1), 1183–1188.
- W. Li; Y. Li; Y. Li; X. Li; L. Zhang; Q. Zhang. *Journal of Materials Chemistry A*, **2014**, 2, 11833–11839.
- H. Guo; X. Zhang; Z. Wang; Y. Li; X. Wang; X. Xu. *Journal of Alloys and Compounds*, **2011**, 509(24), 6784–6789.
- Q. Zhang; W. Wang; Y. Wang; Y. Li. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **2009**, 321(17), 2685–2690.
- Y. Zhang; W. Ma; S. Wang; T. Wang; G. Liu; Y. Zhang; Q. Zhang; J. Zhang. *Journal of Materials Science & Technology*, **2023**, 135, 52–66.
- Y. Chen; S. Liu; F. Wang; J. Zhang; H. Li; S. Zhang; X. Wang; Y. Li; L. Wang; Q. Zhang. *Materials Today Chemistry*, **2022**, 25, 100-997.
- M. Ulfa; D. Prasetyoko; H. Bahruji; R.E. Nugraha. *Materials (Basel)*, **2021**, 14(22), 6779.
- L. Chen; S. Yang; Y. Huang; B. Zhang; F. Kang; D. Ding; T. Cai. *Journal of Hazardous Materials*, **2019**, 371, 566–575.