

AVALIAÇÃO DA FITOTOXICIDADE DE EFLUENTE HOSPITALAR TRATADO COM gC₃N₄: UM ESTUDO COMPLEMENTAR DE EFICIÊNCIA AMBIENTAL

LAVÍNIA DOS SANTOS SOUZA¹; VITOR ROSA DE OLIVEIRA²; CICERO COELHO ESCOBAR³

¹UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS– lavsouzasantos@outlook.com

²VITOR ROSA DE OLIVEIRA – vitor.rosa.oliveira@hotmail.com

³UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS– cicero.escobar@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Efluentes hospitalares podem conter resíduos farmacêuticos, desinfetantes e agentes contrastantes que, mesmo em baixas concentrações, possuem potencial tóxico e resistem aos tratamentos convencionais. Assim, tecnologias de oxidação avançada, como a fotocatálise heterogênea, vêm sendo investigadas como alternativas eficazes para a degradação destes contaminantes.

Dentre os photocatalisadores emergentes, o grafite de carbono nitreto (gC₃N₄) tem se destacado por sua atividade sob luz visível, estabilidade química, baixo custo e possibilidade de modificação estrutural, incluindo sua magnetização para facilitar a recuperação.

Em trabalho anterior, avaliou-se a eficiência de photocatalisadores magnéticos a base de gC₃N₄ na remoção da demanda química de oxigênio (DQO) de efluentes hospitalares reais, com resultados significativos, especialmente após 6 horas de exposição à luz visível artificial. Atingindo reduções próximas a 70%.

Apesar desses avanços, a eficiência físico-química não garante a eliminação completa da toxicidade ambiental. Subprodutos gerados durante a degradação podem manter ou até intensificar efeitos tóxicos, os quais só podem ser detectados por meio de análises ecotoxicológicas.

Testes de fitotoxicidade em espécies vegetais são ferramentas eficazes para avaliar impactos residuais de efluentes tratados sobre organismos vivos. Espécies como *Lactuca sativa* e *Allium Cepa* são tradicionalmente utilizadas devido a sua alta sensibilidade enquanto culturas de interesse agrícola como *Solanum lycopersicum* e *Cucumis sativus* também vem sendo empregadas na literatura por representarem aplicações práticas em reuso de águas residuais (AHMED et al., 2023; DAVIS-SÁ et al., 2021).

Neste estudo, buscou-se avaliar a fitotoxicidade de amostras de efluente hospitalar previamente tratadas por fotólise e fotocatálise heterogênea com g-C₃N₄ por meio de bioensaios com sementes de quatro espécies vegetais: *Solanum lycopersicum*, *Cucumis sativus*, *Lacuna sativa* e *Allium cepa*. As amostras utilizadas correspondem a diferentes tempos de tratamento (2, 4 e 6 horas), com o objetivo de verificar se a redução da carga orgânica observada no estudo anterior se traduz em menor toxicidade biológica. Assim, o presente trabalho visa contribuir para uma validação mais abrangente da eficácia ambiental do processo photocatalítico aplicado ao tratamento de efluentes hospitalares.

2. METODOLOGIA

Para a realização do procedimento de fitotoxicidade foram adaptados os métodos da Regra da análise de sementes (MAPA, 2009) e métodos descritos por

Tiquia e Tam (1998) e Zucconi et al. (1988), a análise foi realizada no laboratório de análise de águas e efluentes da Universidade Federal de Pelotas.

Foram utilizadas sementes de Tomate *Solanum lycopersicum*, Pepino *Cucumis sativus*, Alface *Lactuca sativa* e Cebola *Allium cepa*, previamente selecionadas e com dormência quebrada quando necessário.

Inicialmente, recortaram-se papéis filtro para que se ajustassem ao diâmetro das placas de petri, sendo colocadas duas folhas em cada placa. Esses papéis foram autoclavados para esterilização e, em seguida, secos em estufa por 24 horas. Após a secagem, foi pesado um dos papeis filtros em balança analítica, e a partir deste valor, determinou-se o volume de amostra a ser aplicado pela multiplicação do peso do papel por três.

As placas foram montadas em triplicata para cada amostra analisada. Em cada placa foram dispostas dez sementes, distribuídas sobre o papel filtro. Em seguida, aplicou-se de forma homogênea o volume calculado da amostra, garantindo a completa umidificação do papel. As placas foram devidamente identificadas, vedadas com filme plástico e acondicionadas em incubadora tipo BOD, com fotoperíodo controlado, por um período total de sete dias. A contagem desse período teve início no dia seguinte à montagem do ensaio.

No quarto dia, foi realizada a primeira avaliação da germinação, e, ao final do sétimo dia, procedeu-se à análise final. Nesta etapa, registrou-se o número de sementes germinadas em cada placa e mediu-se o comprimento das radículas com auxílio de régua milimetrada, anotando os valores em milímetros.

A partir dos dados obtidos, calcularam-se o índice de germinação relativa (G%), o alongamento relativo das raízes (AL%) e o índice de germinação (IG%), utilizando-se as seguintes expressões:

$$G(\%) = \frac{N^{\circ} \text{ de sementes germinadas na amostra}}{N^{\circ} \text{ de sementes germinadas no controle}} \times 100$$

$$AL (\%) = \frac{\text{soma dos comprimentos da radicula na amostra}}{\text{soma dos comprimentos da radicula no controle}} \times 100$$

$$IG (\%) = \frac{G(\%) \times AL(\%)}{100}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para o índice de germinação (IG) em sementes de pepino, cebola, alface e tomate, após tratamentos por fotólise e fotocatálise, demonstram variações que podem ser explicadas por características fisiológicas próprias de cada espécie. Como pode ser observado nos gráficos 1 e 2 as sementes de pepino (*Cucumis sativus*) apresentaram tolerância relativamente alta, com IG elevado nos tempos iniciais (0–2 h) para o tratamento de fotólise e recuperação marcante após 6 h de fotocatálise. Esse comportamento é coerente com estudos recentes que apontam que germoplasma de pepino apresenta elevada tolerância a estresses químicos durante a germinação, permitindo recuperação mesmo na presença de compostos adversos, desde que haja tratamento eficiente do meio (LI et al., 2024).

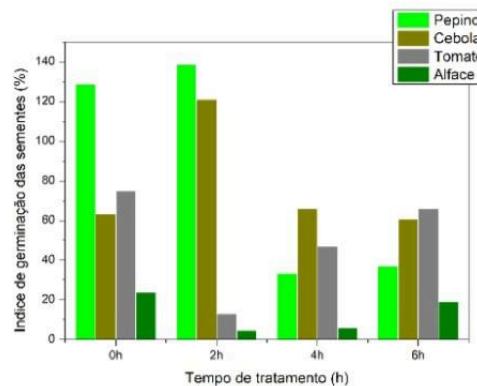


Gráfico 1: Índice de germinação fotólise

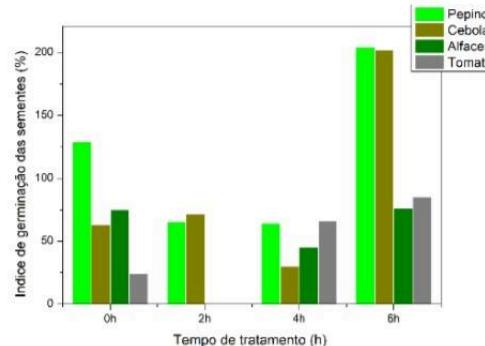


Gráfico 2: Índice de germinação fotocatálise

No caso das sementes de cebola (*Allium cepa*), observando ainda os gráficos 1 e 2 a queda acentuada do IG em tempos intermediários no tratamento por fotólise, seguida de recuperação expressiva após a fotocatálise. Pesquisas recentes demonstram que a cebola é altamente sensível a contaminantes como metais pesados e pesticidas, os quais causam efeitos fitotóxicos, incluindo anormalidades cromossômicas e inibição do crescimento radicular (SINGH et al., 2023). A melhora observada após a fotocatálise sugere que este processo foi eficaz em remover ou degradar parte dos compostos tóxicos presentes no efluente hospitalar, favorecendo a germinação.

Já as sementes de alface (*Lactuca sativa*) apresentaram os valores mais baixos de IG entre todas as espécies testadas, com recuperação limitada mesmo após 6 h de fotocatálise. Estudos recentes indicam que a alface é altamente sensível a condições adversas, possuindo limitações fisiológicas como baixa atividade de enzimas essenciais para a germinação e maior suscetibilidade a compostos inibitórios (KIM; PARK; LEE, 2022). Tais fatores explicam a persistente baixa germinação observada, mesmo após o tratamento mais eficiente.

As sementes de tomate (*Solanum lycopersicum*) apresentaram comportamento intermediário, com IG moderado e leve recuperação após fotocatálise. Embora menos estudadas quanto à fitotoxicidade de efluentes, pesquisas indicam que sementes de tomate podem ser afetadas negativamente por compostos fenólicos e outros inibidores presentes em águas contaminadas, tendo recuperação parcial após remoção desses compostos (ZHANG et al., 2023). A leve melhora após a fotocatálise registrada nos dados confirma a tendência de que a técnica reduz substâncias fitotóxicas, mas não elimina completamente todos os compostos capazes de afetar a germinação.

Assim, os padrões encontrados nos resultados, alta tolerância e recuperação marcante no pepino, sensibilidade inicial na cebola com recuperação após fotocatálise, persistente baixa tolerância na alface e resposta intermediária no tomate, estão alinhados com as diferenças fisiológicas e bioquímicas descritas na literatura recente.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo de fitotoxicidade complementam e reforçam as conclusões do trabalho anterior sobre o tratamento de efluente hospitalar por fotocatálise e fotólise. No estudo anterior, foi demonstrado que a

fotocatálise heterogênea com fotocatalisadores magnéticos à base de g-C₃N₄ proporcionou remoção significativamente superior de DQO em relação à fotólise simples, atingindo reduções próximas de 70% em 6 horas de irradiação, enquanto a fotólise apresentou remoção limitada entre 10% e 20% (DECHAO et al., 2023).

A presente avaliação biológica corrobora esses resultados, mostrando que, ao final de 6 horas de tratamento fotocatalítico, houve aumento expressivo do índice de germinação, especialmente para pepino e cebola, e redução dos efeitos fitotóxicos em todas as espécies testadas, ao passo que a fotólise resultou em respostas mais irregulares e, em alguns casos, na manutenção ou agravamento da toxicidade inicial.

Esses achados indicam que a maior remoção de matéria orgânica e, possivelmente, de compostos recalcitrantes observada no trabalho anterior se traduz em benefícios diretos para a toxicidade biológica do efluente, tornando-o menos nocivo para organismos vegetais.

Dessa forma, a combinação dos dois estudos evidencia que a fotocatálise heterogênea não apenas melhora parâmetros físico-químicos como a DQO, mas também promove uma redução mensurável da toxicidade ambiental, confirmando seu potencial como tecnologia eficiente e sustentável para o tratamento de efluentes hospitalares.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, S. et al. Risk assessment of heavy metals in tomato irrigated with treated wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, Berlin, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-25157-8>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- DAVIS SÁ, E. C. et al. Treatment of a clinical analysis laboratory wastewater from a hospital by photo-Fenton process at four radiation settings and toxicity response. *Environmental Science and Pollution Research*, Berlin, v. 28, p. 17334-17346, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/349455130>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- DECHAO, Y. et al. Recent advances in g-C₃N₄ photocatalysts: A review of reaction parameters, structure design and exfoliation methods. *Catalysts*, v. 13, n. 11, p. 1402, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/11/1402>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- KIM, J.; PARK, S.; LEE, H. Thermosensitivity and germination inhibition in *Lactuca sativa* under abiotic stress conditions. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v. 304, p. 111345, 2022. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111345.
- LI, Y. et al. Effects of environmental stress on cucumber (*Cucumis sativus* L.) seed germination and seedling growth. *Agronomy*, Basel, v. 14, n. 5, p. 1081, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14051081.
- SINGH, P. et al. Allium cepa bioassay: A study on genotoxic and cytotoxic effects of heavy metals in wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, Berlin, v. 30, p. 56745-56756, 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-28094-2.
- ZHANG, X. et al. Effects of phenolic compounds on seed germination and seedling growth of *Solanum lycopersicum*. *Plants*, Basel, v. 12, n. 3, p. 478, 2023. DOI: 10.3390/plants12030478.