

TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO USANDO O₃/UV EM EFLUENTES DE BIODIGESTORES**PHYSICOCHEMICAL TREATMENT USING O₃/UV IN BIODIGESTER EFFLUENTS****TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO MEDIANTE O₃/UV EN EFLUENTES DE BIODIGESTORES**

 10.56238/revgeov17n1-005

João Vitor Moreschi

Mestrando em Engenharia Ambiental
Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
E-mail: moreschij27@gmail.com
Lattes: 7066945123730555
Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-4683-6061>

Camila Ester Hollas

Doutora em Engenharia Agrícola
Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
E-mail: camila.hollas@gmail.com
Lattes: 0057252074635406
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4582-0569>

Ticiane Sauer Pokrywiecki

Doutora em Engenharia Química
Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
E-mail: ticiane@utfpr.edu.br
Lattes: 6567263273805853
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7453-9373>

Marcelo Bortoli

Doutor em Engenharia Química
Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
E-mail: marcelobortoli@utfpr.edu.br
Lattes: 6720828709289767
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0924-9027>

RESUMO

A busca por soluções eficazes e de baixo custo para o tratamento de efluentes, visando mitigar seu elevado potencial de degradação ambiental, levou à avaliação da digestão anaeróbia. Embora seja um processo econômico e eficiente na degradação de matéria orgânica, a digestão anaeróbia gera o digestato, um subproduto que, dependendo de sua composição, requer um pós-tratamento rigoroso. Este estudo objetivou verificar a eficácia do processo O₃/UV (Ozônio/Radiação Ultravioleta), um Processo Oxidativo Avançado (POA), na degradação do digestato coletado de um biodigestor em uma



indústria frigorífica, com a meta de adequá-lo às normas brasileiras de lançamento. O tratamento foi realizado por duas horas, e a avaliação comparativa entre o digestato bruto e o tratado analisou o pH, Cor Verdadeira, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Nitrogênio Amoniacal (N-NH₃). Os resultados obtidos indicaram um desempenho notável do processo O₃/UV, com uma remoção de Cor Verdadeira de 83,54% e um decaimento da DQO de 45,96%, enquanto o pH variou de 7,5 para 8,4 e o N-NH₃ permaneceu estável. Em conclusão, embora o tratamento O₃/UV não tenha atendido integralmente a todas as exigências das normas vigentes, ele se mostrou uma alternativa tecnicamente viável e promissora devido ao seu elevado potencial na melhoria das características físico-químicas do digestato, reduzindo significativamente seu impacto ambiental.

Palavras-chave: O₃/UV. Digestato. Normas. Digestão Anaeróbia. Cor Verdadeira.

ABSTRACT

The search for effective and low-cost solutions for wastewater treatment, aimed at mitigating its high potential for environmental degradation, has led to the evaluation of anaerobic digestion. Although it is an economical and efficient process for degrading organic matter, anaerobic digestion generates digestate, a by-product that, depending on its composition, requires rigorous post-treatment. This study aimed to assess the effectiveness of the O₃/UV (Ozone/Ultraviolet Radiation) process, an Advanced Oxidation Process (AOP), in degrading digestate collected from a biodigester in a meat-processing industry, with the goal of meeting Brazilian discharge standards. The treatment was carried out for two hours, and a comparative evaluation between raw and treated digestate analyzed pH, True Color, Chemical Oxygen Demand (COD), and Ammoniacal Nitrogen (N-NH₃). The results indicated remarkable performance of the O₃/UV process, with an 83.54% removal of True Color and a 45.96% decrease in COD, while pH increased from 7.5 to 8.4 and N-NH₃ remained stable. In conclusion, although the O₃/UV treatment did not fully meet all requirements of current regulations, it proved to be a technically viable and promising alternative due to its high potential to improve the physicochemical characteristics of the digestate, significantly reducing its environmental impact.

Keywords: O₃/UV. Digestate. Regulations. Anaerobic Digestion. True Color.

RESUMEN

La búsqueda de soluciones eficaces y de bajo costo para el tratamiento de efluentes, con el objetivo de mitigar su alto potencial de degradación ambiental, llevó a la evaluación de la digestión anaerobia. Aunque es un proceso económico y eficiente en la degradación de materia orgánica, la digestión anaerobia genera el digestato, un subproducto que, dependiendo de su composición, requiere un postratamiento riguroso. Este estudio tuvo como objetivo verificar la eficacia del proceso O₃/UV (Ozono/Radiación Ultravioleta), un Proceso de Oxidación Avanzada (POA), en la degradación del digestato recolectado de un biodigestor en una industria frigorífica, con la meta de adecuarlo a las normas brasileñas de vertido. El tratamiento se realizó durante dos horas, y la evaluación comparativa entre el digestato bruto y el tratado analizó el pH, Color Verdadero, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃). Los resultados obtenidos indicaron un notable desempeño del proceso O₃/UV, con una remoción del Color Verdadero del 83,54% y una disminución de la DQO del 45,96%, mientras que el pH varió de 7,5 a 8,4 y el N-NH₃ se mantuvo estable. En conclusión, aunque el tratamiento O₃/UV no cumplió completamente con todos los requisitos de las normas vigentes, se mostró como una alternativa técnica viable y prometedora debido a su alto potencial para mejorar las características físico-químicas del digestato, reduciendo significativamente su impacto ambiental.

Palabras clave: O₃/UV. Digestato. Normas. Digestión Anaeróbia. Color Verdadero.



1 INTRODUÇÃO

A preocupação dos países com o planeta vem crescendo nos últimos tempos e com isso o surgimento de acordos e tratados para minimizar os impactos ambientais que as indústrias e cidades vem fazendo ao longo de anos. A Organização das Nações Unidas (ONU) mostra os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), que o mundo tem tentado obter até 2030, dentre estes objetivos está: a energia limpa e acessível, vida na água e ação contra a mudança climática (Nações Unidas no Brasil 2025).

Tendo em Visto estes objetivos algumas indústrias brasileiras vêm tentando se encaixar nas ODS, escolhendo utilizar energias limpas e renováveis provenientes de hidrelétricas ou utilizando biocombustíveis. Há também a preocupação de tratar os gases dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) que são gases de efeito estufa, e tratar os efluentes antes de serem lançados em rios e mares evitando agredir de forma severa a vida aquática (Nações Unidas no Brasil 2025).

Nos últimos anos as indústrias veem estudando formas de conseguirem tratar os seus efluentes de forma mais eficazes e com baixo custo, evitando que ocorra degradação elevada do meio ambiente ao descartar de forma incorreta seus efluentes. Uma forma de tratar os efluentes industriais ou da cidade é a digestão anaeróbia com biodigestores.

Os biodigestores trabalham com microrganismos que degradam matéria orgânica e a transformam em dois subprodutos, o biogás e o digestato (biofertilizante). O biogás pode ser utilizado como fonte de energia ao ser queimado em caldeiras ou geradores, já o digestato dependendo da sua composição ele pode ser utilizado com biofertilizante (AMARAL *et. al*, 2019).

No Brasil em 2022 cerca de 936 plantas de biodigestores estavam cadastradas no sistema do BIOGÁSMAP, conseguindo tratar efluentes e produzindo cerca de 2,81 bilhões de Nm³/ano de biogás para geração de energia limpa. Destas 936 cerca de 324 estão instaladas no sul do Brasil, produzindo certa de 480 milhões de Nm³/ano, sendo que 198 destes biodigestores estão instalados no Paraná (CIBIOGÁS 2022).

O digestato na sua composição é rico em nutrientes que podem ser usados em plantações, mas em alguns casos, sua concentração de nutrientes é baixa, fazendo com que sua utilização como biofertilizante seja inviável, sendo necessário o tratamento do digestato para que ele possa ser lançado em algum corpo hídrico sem ter um impacto ambiental (Candido, 2022).

O pós-tratamento do digestato é necessário para cumprir as normas vigentes no Brasil de lançamento de efluentes em corpos hídricos (CONAMA N430/2011 e a SEMA 70/2009 anexo 7), essas normas apresentam quais são os parâmetros mínimos para que um efluente possa ser lançado em um corpo hídrico sem prejudicar o meio ambiente. (BRASIL, 2011 e PARANÁ 2020).

Após o tratamento com o biodigestor, existem alguns pós-tratamentos que são usados para minimizar os poluentes presentes no digestato, removendo patogênicos, metais pesados e reduzindo



cargas orgânicas. Esses pós-tratamentos podem ser, lagoas de decantação, lagoas aeradas e ou anaeróbicas e lagoas de equalização (Candido 2022), fazendo com que o digestato se encaixe nas normas brasileiras.

Visto que, na digestão anaeróbia possa ter acréscimo de alguns parâmetros como a concentração de amônia, e a remoção da DQO não consiga atingir os parâmetros de lançamento em corpos hídricos, uma alternativa para o pós-tratamento é o tratamento avançado com ozônio (O_3) que consegue diretamente ou indiretamente degradar os compostos do efluente (RUFFATTO, 2023).

Uma forma eficaz de usar o ozônio é utilizando a fotoionização (O_3/UV) que consiste em 3 etapas de degradação, onde o O_3 oxida os poluentes, na sequência o UV faz a fotodegradação e por último o UV usa as moléculas O_3 como radical hidroxila ($\cdot OH$) para degradar de forma indireta o restante dos poluentes que se encontram no efluente (LU *et. al*, 2022).

O pós-tratamento com O_3/UV consegue ter uma eficiência na remoção de DQO em efluentes de gás de xisto, quando comparado com a utilização apenas a luz ultravioleta (UV), a luz ultravioleta com dióxido de titânio (UV/TiO_2) ou somente o Ozônio como apresentado por LU *et. al*, (2019), onde conseguiram 77% de remoção da DQO em 30 minutos de experimento quando comparado com o UV/TiO_2 que teve somente 6% de remoção.

Nesse contexto o estudo presente fez uma análise inicial verificando a possibilidade do efluente de biodigestores (digestato) serem tratados com O_3/UV , analisando os parâmetros de pH, cor, demanda química de oxigênio (DQO) e teor de nitrogênio amoniacal ($N-NH_3$) antes e depois do tratamento físico-químico, e comparando com a legislação brasileira vigente.

2 METODOLOGIA

As análises foram realizadas nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no campus de Francisco Beltrão. O digestato utilizado no estudo, veio de um biodigestor que recebe efluentes provenientes de um abatedouro de bovinos, localizado em um município no sudoeste do Paraná.

Durante a pesquisa foi coletada um montante de 10 litros de digestato. As amostras foram armazenadas em recipientes de 5 litros e mantidas refrigeradas em uma geladeira, até serem realizadas as análises. O Quadro 1 apresenta as análises que foram realizadas, os equipamentos utilizados e a metodologia utilizada para obtenção dos resultados. Todas foram feitas em triplicata.

Quadro 1 – Análises realizadas na pesquisa antes e depois do tratamento com O_3/UV

Análises	Metodologia	Equipamentos utilizados para as análises
Cor Verdadeira	Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater - 20th Edition	Espectrofotômetro UV-VIS

		Sistema de filtragem a vácuo
pH	Sem metodologia específica	Potenciômetro portátil.
DQO (Demanda Química Orgânica)	Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater - 20th Edition	Bloco digestor Espectrofotômetro UV-VIS
Teor de Nitrogênio amoniacal	Método semimicro Kjeldahl	Bloco de digestão Destilador de nitrogênio

Fonte: Autoria Própria (2025).

Para a realização da Foto-Ozonização (O₃/UV) foi utilizado um gerador de Ozônio da marca OZONIC, modelo OZONIC OP que gera 730mg/H em 2.8L/min ar ambiente (RH 85%) de ozônio; neste gerador foi plugado uma tubulação e na ponta dela tem um difusor de pedra porosa que ficou no fundo do fotoreator.

O fotoreator tem o volume útil de operação de dois litros, sendo suas dimensões de 37 cm de altura por 11 cm de diâmetro, fechado de um dos lados, enquanto o outro lado tem uma tampa que tem acessos a lâmpada ultravioleta e uma para as tubulações de implementação do ozônio ao meio e outra para realização das coletas de amostras.

A lâmpada ultravioleta (UV) utilizada é de vapor de mercúrio com oito watts de potência e tem uma fonte de $\lambda=254$ nm, esta lâmpada fica fixada no acesso central da tampa do fotoreator para que fique segura e com o menor risco de impacto com as paredes do fotoreator, foi usado um agitador magnético com uma barra magnética que auxilia na agitação do efluente dentro do fotoreator, para que a amostra fique homogênea e consiga ser tratada por inteiro durante a pesquisa.

O digestato ficou duas horas sendo agitado e tratado continuamente com O₃/UV, e após o tratamento a amostra tratada foi armazenada em um frasco Amber, e refrigerada juntamente com o restante da amostra bruta para a realização das análises subsequentes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 demonstra as médias dos resultados obtidos das análises realizadas durante a pesquisa e suas unidades de medida.

Tabela 1 – Resultados obtidos das análises da pesquisa

	Amostra Bruta	Amostra Tratada
Cor Verdadeira (mg Pt-Col/L)	1580	260
pH	7,5	8,4
DQO (ml O₂/L)	556,23	300,60
Nitrogênio Amoniacal (ml)	188,16	185,92

Fonte: Autoria Própria (2025).



O digestato após passar pelo processo de tratamento com o ozônio e luz UV apresentou uma mudança na sua coloração, é possível verificar que há um decaimento elevado na cor das amostras após o tratamento, chegando a 83,54% de redução de cor, de 1580 para 260 mg Pt-Col/L.

Pourgholi *et. al* (2018) também testaram diferentes tratamento físico-químico para remover a cor de um efluente têxtil, e obtiveram um resultado de 66,5% de remoção de cor utilizando o O₃/UV em 30 minutos de reação. Indicando que a remoção de cor verdadeira utilizando o O₃/UV tem um potencial elevado.

ZADEH *et. al* (2017) fizeram um estudo em amostras ricas com o corante amarelo 3 reativos, onde trataram por 40 minutos com O₃/UV e conseguindo obter uma remoção de 85%, resultado próximo ao obtido no tratamento do digestato, mas com um tempo inferior de tratamento, se comparado com as duas horas de tratamento do digestato.

O uso do O₃/UV, dependendo da amostra de efluente, tem apresentado resultados eficientes na remoção da cor verdadeira das amostras. Em alguns casos a adição de um reagente favorece a reação e melhora a performar-se do processo de tratamento, ajudando a diminuir o tempo de reação e melhora da remoção da cor.

Como no estudo de GHANBARI *et. al* 2021 que utilizaram o O₃/UV, com adição de cinco milimol (mM) de peroximonossulfato (PMS). Os autores trataram efluentes que estavam contaminados com chorume de aterros, e obtiveram uma remoção de 98% de color, com um período de 75 minutos de exposição das amostras. A adição de PMS ajudou a remover a cor em 14,46% a mais do que no presente estudo, ajudando também a diminuir o tempo de tratamento em 45 minutos.

O estudo de Shahamat *et. al* em 2022, mostrou que O₃/UV conseguiu tratar amostras sem adição de nenhum composto ou reagentes para melhorar a eficiência de tratamento, somente mudando a concentração de corante, tempo de reação e o pH do meio, sendo as amostras contaminadas com corante vermelho azo-60. Nessa pesquisa conseguiram remover 100% do corante em 60 minutos de reação, indicando mais uma vez que o O₃/UV tem um elevado potencial de remoção de cor de amostras.

Mesmo que a cor verdadeira não seja uma análise exigida pelas normas da legislação vigente brasileira para o descartadas de efluentes industrias em rios, é relevante visualmente e cientificamente, visto que não há uma gama elevada de estudo que aprofundam a pesquisa e a análise do tratamento de digestato usando O₃/UV. E neste estudo realizado foi possível visualizar que o uso do O₃/UV tem potencial elevado para ser incorporado nas etapas de pós-tratamento do digestato.

A variação de pH pode interferir na vida aquática do corpo hídrico, podendo ocasionar o crescimento demorado de algumas espécies de peixes, caso o pH for abaixo de 5,0 pode levar os peixes a morrer devido a toxicidade do rio com altos índices do íon H⁺. (VAL *et al.* 1998), e pH alcalinos favorecem o crescimento de N-NH₃, sendo que elevadas concentrações de N-NH₃ no meio é tóxico para a vida aquática (BOLNER & BALDISSEROTTO, 2007).



Figueiredo *et. al* (2018) mostrou que valores de pH próximos a neutralidade, não são prejudiciais para peixes, valores de pH abaixo de 6 desfavorece a vida aquática no seu desenvolvimento e valores acima de 10 também prejudica o crescimento de peixes, mantendo uma faixa de pH próxima da neutralidade, não vai ser prejudicial para o meio aquático.

O nível do pH pela perspectiva de SHARMA *et. al* (2023), pode ajudar ou atrapalhar a remoção e a degradação de poluentes presentes nos efluentes, segundo ele o pH alcalino ajuda o ozônio a remover de forma mais eficaz os poluentes devido a formação de radicais hidroxila. No seu estudo ele conseguiu ter uma performance melhor com o pH 12 do que com o pH 4 para remoção de corantes em suas amostras, mostrando que o pH alcalino no processo de O₃/UV ajuda na remoção de corantes.

Os valores de pH foram avaliados e observou-se que o valor de pH inicial foi de 7,5 no início e 8,4 no final do tratamento, havendo um aumento no valor de pH de 0,9 durante o processo, mesmo com essa elevação o efluente tratado se encaixa dentro das normas que a CONAMA exige, ficando dentro da faixa de pH de 5 a 9 para ser lançado no corpo hídrico. (BRASIL 2011)

Ao comparar com os resultados obtidos no presente estudo com os dados encontrados de SHARMA *et. al* (2023) em seu estudo, pH ficou acima da neutralidade, podendo ser considerado um fator favorável ajudado na obtenção dos resultados de remoção da cor verdadeira do digestato.

A análise de DQO para o efluente bruto foi de 556,23 mg O₂/L e para o efluente tratado foi de 300,60 mg O₂/L, obtendo uma remoção elevada na concentração de DQO após o tratamento com O₃/UV de 45,96% nas duas horas de exposição ao tratamento, podendo ser um indicador favorável de que o tratamento pode ser eficaz para remoção de DQO para este tipo de efluente.

Ao analisar os dados obtidos por Zhao *et. al* 2022, onde estudaram e compararam o tratamento de lixiviado de incineração com O₃/catalisador e O₃/UV, a remoção de DQO com O₃/UV chegou a 82,3% em 80 minutos, sendo que o lixiviado (ou popularmente conhecido como Chorume) é o líquido proveniente da degradação de materiais, que por sua vez pode ter uma cor escura e cheiro forte, e elevada concentração de DQO (PRESENTI *et. al* 2023).

No estudo de Wen *et. al* em 2022, a remoção de DQO em efluente provenientes da produção do herbicida Atrazina teve valores próximos aos obtidos ao presente estudo, obtendo 57% de redução da DQO em 180 minutos (três horas) de tratamento. Eficiência superior, porém, com tempo de tratamento maior indicando que o tempo de tratamento pode ser um possível indicador da melhor performance no tratamento.

Ao analisar os dados obtidos no presente estudo, o efluente tratado ainda não se encaixa nas normas de lançamento em corpos hídricos na legislação de SEMA 70/2009 anexo 7, que exige que a DQO para efluentes de frigoríficos, seja menor ou igual a 200 mg/L., mas os resultados obtidos se mostram promissores na redução da DQO.



Estudos mostram que concentrações elevadas de nitrogênio amoniacal nos corpos hídricos é prejudicial a vida aquática, podendo aumentar a mortalidade de peixes, fazendo com que aumente a dificuldade de respiração com o meio, levando os peixes a buscarem oxigênio na superfície do corpo hídrico (DIAS *et al.* 2019).

Pinheiro *et.al* (2021) mostraram em seus estudos sobre a toxicidade do nitrogênio amoniacal em peixes da espécie pacu, que o N-NH₃ em concentrações superiores a 1,67mg/L é tóxico, chegando à mortalidade de 100% da espécie em 92,5 horas de exposição, sendo que o pacu (*Piaractus Mesopotamicus*) é um peixe nativo do Brasil e com grande aceitação comercial.

A amônia é também tóxica para os corais, Busanello *et. al* em 2023, mostrou em sua pesquisa que concentrações superiores a 0,28 mg/L de N-NH₃, os corais *Xenia umbellata* tiveram mortalidade após 96 horas de exposição. Mostrando que concentrações baixas de N-NH₃ ainda continua sendo tóxicas para o meio, sendo para peixes ou para outros seres vivos aquáticos.

Ao analisar os resultados obtidos no presente estudo, nota-se que não houve variações significativas entre a amostra bruta e a tratada com O₃/UV, tendo uma variação menor que 2%, indicando que a N-NH₃ não foi afetada pelo tratamento com O₃/UV.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que o tratamento com O₃/UV promove uma redução significativa da cor verdadeira e das concentrações de DQO do digestato, demonstrando elevada eficiência na remoção de compostos cromóforos. Embora a remoção de DQO não tenha sido completa, os níveis alcançados foram superiores aos observados em estudos similares, evidenciando o potencial do processo. Em contrapartida, não se observou eficiência significativa na remoção de N-NH₃, indicando a necessidade de estratégias complementares para esse parâmetro. O pH das amostras tratadas manteve-se estável, permanecendo dentro da faixa considerada segura para organismos aquáticos e em conformidade com os limites estabelecidos pela legislação vigente. Os resultados evidenciam que o tratamento por O₃/UV apresenta elevado potencial técnico para aplicação em digestato, sobretudo no que tange à remoção de carga orgânica e cor verdadeira, configurando-se como uma alternativa promissora no contexto do aprimoramento de tecnologias aplicadas ao tratamento de efluentes agroindustriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária PR/Edital CENTELHA II (Projeto N° CEN2023051000013) pela bolsa de Desenvolvimento Tecnológico, à CAPES pela bolsa de mestrado e ao apoio concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil, por meio de uma bolsa de pós-doutorado (172156/2023-8).



REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. Os biodigestores. In: *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. p. 13–26.
- BOLNER, K. C. S.; BALDISSEROTTO, B. Water pH and urinary excretion in silver catfish *Rhamdia quelen*. *Journal of Fish Biology*, v. 70, p. 50–64, 2007.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA n. 430, de 2011. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/publicacoes/245-resolucao/185-conama-n-430-de-2011?layout=publicacoes>. Acesso em: 23 abr. 2025.
- BUSANELLO, Giovanni Martins *et al.* Acute toxicity of ammonia for soft coral *Xenia umbellata* (Lamarck, 1916). *Arquivos de Ciências do Mar*, Fortaleza, v. 57, n. 2, p. 1–10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.32360/acmar.v57i2.92219>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- CANDIDO, Daniela *et al.* Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. *Journal of Environmental Management*, v. 301, 2022, 113825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113825>.
- CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. *Webinar: Panorama do biogás no Brasil – 2022*. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/webinar-panorama-do-biogas-no-brasil-2022>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- DIAS, Evllen Cardoso *et al.* Qualidade físico-química, microbiológica e a toxicidade de corpos hídricos do Parque Tecnológico Vandeci Rack em Ji-Paraná, Rondônia. *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*, [S. l.], v. 6, n. 1, 2019. Disponível em: <https://teste-periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/2176>. Acesso em: 7 abr. 2025.
- FIGUEIREDO, F. M. *et al.* Exploratory study of limnological parameters during the cycle of tambaqui fingerlings. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, [S. l.], v. 22, p. e11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117034580>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/34580>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- GHANBARI, F. *et al.* Evaluation of peroxymonosulfate/O₃/UV process on a real polluted water with landfill leachate: Feasibility and comparative study. *Korean Journal of Chemical Engineering*, v. 38, p. 1416–1424, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0782-8>.
- LU, Hai; LI, Qingpo; FENG, Weihao. Application progress of O₃/UV advanced oxidation technology in the treatment of organic pollutants in water. *Sustainability*, v. 14, n. 3, p. 1556, 28 jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14031556>. Acesso em: 23 abr. 2025.
- LU, Tao *et al.* Efficient degradation of evaporative condensing liquid of shale gas wastewater using O₃/UV process. *Process Safety and Environmental Protection*, [S. l.], v. 121, p. 175–183, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.10.011>. Acesso em: 23 abr. 2025.
- NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- PARANÁ. Instituto Água e Terra (IAT). Anexo 7: CEMA 70/09 - Padrões para o lançamento de efluentes líquidos. Disponível em: [REVISTA REGEO, São José dos Pinhais, v.17, n.1, p.1-11, 2026](https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-</p></div><div data-bbox=)



terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-09/anexo_7_cema_70-09_padroes_para_o_lancamento_de_efluentes_liquidos.pdf. Acesso em: 23 abr. 2025.

PESENTI, M. E. A. et al. Avaliação do potencial biorremediador dos fungos *Candida* spp. e *Trichophyton* spp. no tratamento de lixiviado proveniente de aterro sanitário. *Holos*, [S. l.], v. 39, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2023.16307>. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16307>. Acesso em: 23 jul. 2025.

POURGHOLI, Mehrangiz et al. Removal of Dye and COD from Textile Wastewater Using AOP (UV/O₃, UV/H₂O₂, O₃/H₂O₂ and UV/H₂O₂/O₃). *Revista de Saúde Ambiental e Desenvolvimento Sustentável*, [S. l.], v. 3, n. 4, 20 dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.18502/jehsd.v3i4.223>. Acesso em: 23 abr. 2025.

RUFFATTO, Murilo Vendramin. Avaliação do uso de radiação UV, ozônio e catalisadores bem como suas combinações para degradação do herbicida 2,4-D. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/267639>. Acesso em: 23 abr. 2025.

SIQUEIRA MANRIQUE PINHEIRO, Lucas et al. Toxicidade aguda da amônia em pacu (*Piaractus mesopotamicus*). *Revista Acadêmica Ciência Animal*, [S. l.], v. 19, p. 1–8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.7213/acad.2021.19004>. Acesso em: 15 abr. 2025.

SHAHAMAT, Yousef Dadban et al. Removal of azo red-60 dye by advanced oxidation process O₃/UV from textile wastewaters using Box-Behnken design. *Inorganic Chemistry Communications*, v. 143, p. 109785, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387700322005937>. Acesso em: 18 jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109785>.

SHARMA, S.; CHOKSHI, N.; RUPARELIA, J. P. Efeito dos parâmetros operacionais no processo de O₃, O₃/UV, O₃/UV/PS usando um reator de coluna de bolhas para degradação de corantes reativos. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, v. 104, p. 565–578, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40030-023-00735-8>.

VAL, A. L. et al. Responses of an Amazonian teleost, the tambaqui (*Colossoma macropomum*), to low pH in extremely soft water. *Physiological Zoology*, v. 71, p. 658–670, 1998.

WEN, Diya; CHEN, Bing; LIU, Bo. Um processo de ultrassom/O₃ e UV/O₃ para tratamento de efluentes da indústria de atrazina: um estudo experimental em múltiplas escalas. *Water Science and Technology*, Londres, v. 85, n. 1, p. 229–243, 1 jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.633>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/85/1/229/83690>. Acesso em: 23 jul. 2025.

ZADEH, Kobra Rajabi; MALAKOOTIAN, Mohammad. O₃/UV photo-oxidation for the removal of reactive yellow 3 dye from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, [S. l.], v. 81, p. 322–326, 2017. ISSN 1944-3986. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21178>. Acesso em: 23 abr. 2025.

ZHAO, Zhiwei; GAN, Pengfei; ZHU, Chengjun; LI, Yunyi; LIU, Wen; TONG, Meiping; YE, Jiangyu; LIANG, Jialiang. Comparative evaluation of MSW incineration leachate treatment by heterogeneous catalytic O₃ and UV/O₃: the unexpected contribution of high salinity and overlooked role of excited state. *Chemosphere*, [S. l.], v. 307, parte 4, 2022. ISSN 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136143>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522026364>. Acesso em: 23 jul. 2025.

