

AVANÇOS NO TRATAMENTO BIOLÓGICO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA REVISÃO DAS INOVAÇÕES E TENDÊNCIAS

ADVANCES IN BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT: A REVIEW OF
INNOVATIONS AND TRENDS

AVANCES EN EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES: UNA
REVISIÓN DE INNOVACIONES Y TENDENCIAS

Ana Paula Alves Feitosa de Amorim¹, José Matias Santos Silva², Rafaela Dantas de Lucena Rocha³,
Thamires Carolayne Cavalcanti Moura⁴, Ilka Djanira Ferreira do Nascimento⁵

DOI: 10.54899/dcs.v22i85.3956

Recibido: 04/11/2025 | Aceptado: 28/11/2025 | Publicación en línea: 03/12/2025.

RESUMO

A presença de contaminantes, seus subprodutos, patógenos e o nível elevado de nutrientes remanescentes após o tratamento biológico de águas residuárias representa um risco ao meio ambiente e às práticas de reúso, ressaltando a necessidade de atualizações nos sistemas de tratamento. Para este estudo, foi aplicado um modelo híbrido de análise da literatura e de parâmetros bibliométricos, fazendo uso da base de dados Scopus e da sistematização pelo método PRISMA. Além disso, o uso do software VOSviewer contribuiu para a abordagem qualitativa e quantitativa da produção científica na análise bibliométrica das publicações. As diversas estratégias utilizadas para minimizar a produção de lodo, bem como aprimorar a transformação, redução ou remoção de fármacos, corantes e nutrientes, fazendo uso de agentes químicos e materiais, ou integrando, aperfeiçoando e otimizando processos, além da identificação de comunidades microbianas degradadoras, revelaram o empenho para obter um tratamento eficiente e que reduza impactos a longo prazo. Entretanto, a persistência ou a baixa redução de contaminantes reforça a importância de inovações no tratamento de águas residuárias. A China concentra o maior número de estudos relacionados ao tema, enquanto o Brasil permaneceu ausente no período analisado.

Palavras-chave: Águas Residuárias. Contaminantes Emergentes. Tratamento Biológico. Revisão Bibliográfica.

¹ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: ana.afeitosa@ufpe.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0283-3466>

² Graduando em Química, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: matias.santos@ufpe.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-5511-4913>

³ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: rafadantas_lucena@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0673-1579>

⁴ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: tccmoura@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4762-3849>

⁵ Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: ilkadjanira@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5575-7578>

ABSTRACT

The presence of contaminants, their by-products, pathogens, and the high level of remaining nutrients after biological treatment of wastewater represents a risk to the environment and reuse practices, highlighting the need for updates in treatment systems. For this study, a hybrid model combining literature analysis and bibliometric parameters was applied, utilizing the Scopus database and systematization through the PRISMA method. Furthermore, the use of VOSviewer software contributed to the qualitative and quantitative approach to scientific production in the bibliometric analysis of publications. The various strategies used to minimize sludge production, as well as to enhance the transformation, reduction, or removal of pharmaceuticals, dyes, and nutrients through chemical agents and materials, or by integrating, refining, and optimizing processes, in addition to identifying degrading microbial communities, demonstrated the effort to achieve efficient treatment that reduces long-term impacts. However, the persistence or low reduction of contaminants reinforces the importance of innovations in wastewater treatment. China accounts for the largest number of studies on this topic, while Brazil was absent during the analyzed period.

Keywords: Wastewater. Emerging Contaminants. Biological Treatment. Literature Review..

RESUMEN

La presencia de contaminantes, sus subproductos, patógenos y el nivel elevado de nutrientes remanentes tras el tratamiento biológico de aguas residuales representa un riesgo para el medio ambiente y las prácticas de reúso, resaltando la necesidad de actualizaciones en los sistemas de tratamiento. Para este estudio, se aplicó un modelo híbrido de análisis de la literatura y de parámetros bibliométricos, utilizando la base de datos Scopus y la sistematización mediante el método PRISMA. Además, el uso del software VOSviewer contribuyó al enfoque cualitativo y cuantitativo de la producción científica en el análisis bibliométrico de las publicaciones. Las diversas estrategias utilizadas para minimizar la producción de lodo, así como para mejorar la transformación, reducción o eliminación de fármacos, colorantes y nutrientes, haciendo uso de agentes químicos y materiales, o integrando, perfeccionando y optimizando procesos, además de la identificación de comunidades microbianas degradadoras, revelaron el empeño por lograr un tratamiento eficiente que reduzca los impactos a largo plazo. No obstante, la persistencia o la baja reducción de contaminantes refuerza la importancia de innovaciones en el tratamiento de aguas residuales. China concentra el mayor número de estudios relacionados con el tema, mientras que Brasil permaneció ausente en el período analizado.

Palabras clave: Aguas Residuales. Contaminantes Emergentes. Tratamiento Biológico. Revisión Bibliográfica.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A escassez hídrica, potencializada por eventos como as mudanças climáticas, representa um grande desafio para os setores agrícola, energético e industrial, pois têm crescente necessidade por recursos hídricos devido ao crescimento populacional (Cantelle, 2018). Isso mudou a percepção sobre o papel das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), fazendo destas, fontes alternativas de água.

A eficiência do tratamento biológico foi um dos fatores que elevou a qualidade do efluente através da remoção de contaminantes por meio do lodo ativado, o que contribuiu para o seu grande uso nas ETEs como uma tecnologia dominante no processo de tratamento (Wanner, 2021).

Entretanto, a presença de contaminantes emergentes, subprodutos, patógenos e a alta carga de nutrientes ainda presente nos efluentes domésticos revelam um quadro preocupante. O que indica a necessidade de otimizações no processo de tratamento de águas residuárias, de modo a garantir maior eficiência ao sistema e evitar danos ao meio ambiente (Marçal *et al.*, 2017; Weizel *et al.*, 2021; Dantas *et al.*, 2022). Isso vai de encontro com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº6, que estimula ações voltadas à redução da poluição de corpos hídricos oriunda do descarte de contaminantes, além da gestão e tratamento de efluentes (ONU, 2022).

A atualização nos processos de tratamento das ETEs a fim de alcançar padrões ambientais mais elevados é uma prática cada vez mais adotada (Guo *et al.*, 2025). Assim, revisões sistemáticas e bibliográficas são importantes para reunir e organizar dados de pesquisas, promovendo o desenvolvimento teórico e o avanço científico, além de permitirem um melhor entendimento, a busca de respostas e o teste de hipóteses acerca do problema estudado (Camilo *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2021).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo realizar, através de uma revisão bibliográfica, um levantamento dos avanços relacionados ao tratamento de águas residuárias nos últimos cinco anos, discutindo qualitativa e quantitativamente a produção científica e o processo metodológico de revisão sistemática para a síntese de resultados fazendo uso de um modelo híbrido de análise da literatura e parâmetros bibliométricos.

METODOLOGIA

Neste estudo foi utilizado um modelo descrito em Pluye e Hong (2014), o qual foi aplicado por meio da sistematização de um conjunto de fases e etapas, através de investigações do panorama, aplicações e resultados obtidos. A investigação da pesquisa foi delimitada por quatro fases realizadas em sequência: busca de dados, meta análise, análise bibliométrica e análise sistemática.

Para a busca, foi utilizada a base de dados Scopus, acessada a partir do portal da CAPES (CNPq), com pesquisa realizada em abril de 2025. A partir da seleção inicial, foram avaliados cada artigo conforme método de sistematização conhecido como PRISMA (Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises). Este método é dividido em quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão para realizar a seleção final dos artigos e atender aos critérios da temática destes (Moher *et al.*, 2010).

A busca foi limitada à literatura publicada entre janeiro de 2019 a abril de 2025. Na primeira etapa do método PRISMA (identificação) se buscou, simultaneamente, as palavras-chave "Biological wastewater treatment", "Biological processes", "Activated sludge", "Biological reactors", "Bioremediation", "Organic matter degradation", "Biodegradation", "Environmental sustainability", "Pollutant removal", com operadores Booleano "or" e "and", o que resultou na localização de 89 publicações.

Na segunda fase (seleção), a amostra foi reduzida para 63 artigos científicos ao serem aplicados critérios de exclusão, removendo artigos de revisão, livros e documentos de conferência, além de selecionar apenas artigos escritos em inglês. Na etapa de elegibilidade, foram lidos os títulos e resumos dos 63 artigos resultantes da etapa anterior, restando 25 artigos ao final desta etapa.

Na etapa de inclusão, foram lidos na íntegra 25 artigos para análise da produção científica, em que os dados bibliométricos desses artigos foram exportados para o software de bibliometria, no formato (.csv), para então serem lidos. A análise bibliométrica foi utilizada para analisar as literaturas científicas e examinar quantitativamente um número de publicação usando técnicas matemáticas e estatísticas, permitindo determinar a rede, estrutura, conexões interdisciplinares e evolução do campo de pesquisa, além de permitir previsões sobre os próximos trabalhos (Ramirez *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2019).

O software VOSviewer foi utilizado para análise qualitativa, a partir da construção de

redes bibliométricas, na quais as cores indicam os grupos formados (clusters) e o tamanho, os arcos da rede representam a relação entre os elementos interligados e o tamanho do círculo de cada elemento indica o seu impacto na análise realizada.

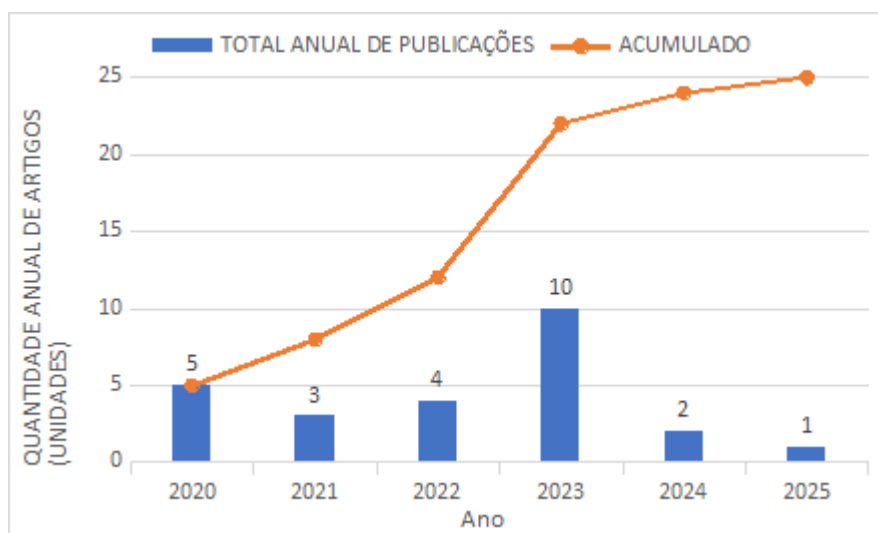
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Bibliométrica

Os artigos científicos no âmbito mundial, a partir das palavras-chave escolhidas que abordaram o tema tratamento biológico, através da busca de dados na plataforma Scopus totalizaram 25 publicações, Figura 1, com a primeira em 2020. A tendência das publicações está relacionada à avaliação da eficiência de métodos convencionais e fatores que impactam a remoção de contaminantes através de processos biológicos, seja por meio da adição isolada ou pelo consórcio envolvendo espécies químicas, mecanismos físicos, materiais orgânicos e inorgânicos, microrganismos, biofilmes ou reatores, no período de 2019 a 2025.

Figura 1

Evolução do número de publicações sobre tratamento biológico de águas residuárias.



O primeiro artigo a abordar a temática discutida foi publicado no ano de 2020, o que permite inferir que, durante o ano de 2019, não foram publicadas pesquisas nesse viés. No ano de 2020 foram publicados 5 artigos, o que mostra o interesse pela busca de eficiência do

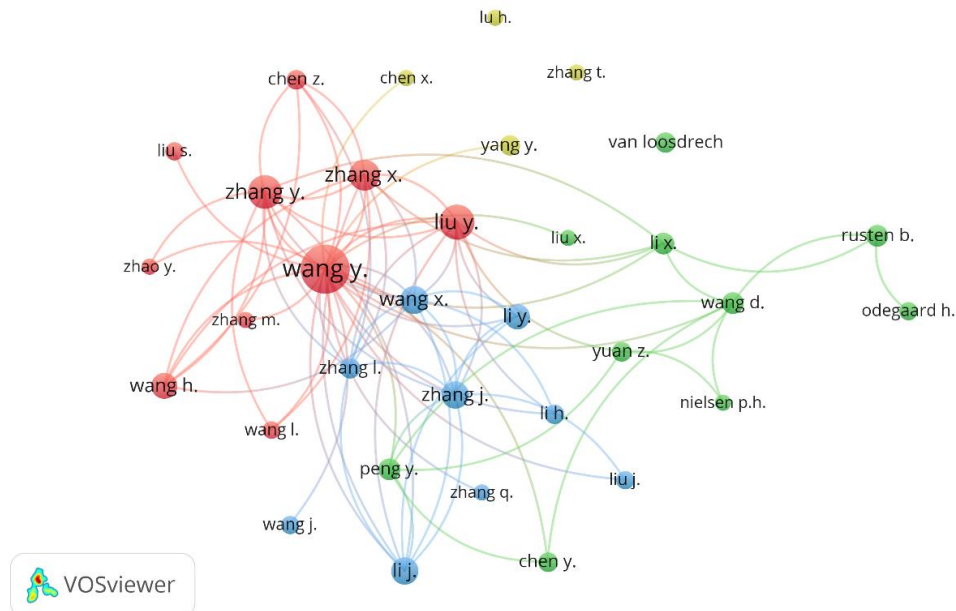
tratamento biológico, e isto pode estar relacionado à pandemia. Race *et al.* (2020) e Zahmatkesh *et al.* (2022), destacaram a necessidade de pesquisas relacionadas ao tratamento eficaz de águas residuárias para a remoção de contaminantes, e que não causem efeitos negativos a longo prazo, em especial durante a pandemia da COVID 19, cuja preocupação com a disseminação do vírus e a toxicidade dos medicamentos ministrados durante esse período, nesses efluentes, se intensificou.

O ano de 2023 apresentou a maior quantidade de artigos publicados, 10 publicações no total, 40% de todas as publicações no período. Isso foi resultado do interesse pela qualidade das águas pós-pandemia e a necessidade de tratamentos mais específicos para a remoção de substâncias. Após o ano de 2023, nota-se um decréscimo em pesquisas relacionadas ao tratamento biológico de águas residuárias.

Através da rede de coautoria estabelecida é possível mapear a relação entre pesquisadores de diferentes países que colaboram mutuamente em suas pesquisas (Aragão Junior e Oliveira Junior, 2021). Avaliando a dinâmica das citações entre os autores das 25 publicações que norteiam esta revisão, Figura 2, percebe-se uma relação direta entre estes em seus trabalhos, a interação entre os 4 grupos identificados por cores, é representada pelo alcance do nó correspondente a cada autor. A continuidade das conexões estabelecidas entre os autores revela a correlação e contribuição mútua entre eles em seus estudos. Uma maior cooperação é observada entre Wang Y., Liu Y., Zhang Y. e Zhang X., que se encontram em destaque por apresentarem maior citação mútua; dentre estes, Wang Y. se destaca como autor mais referenciado pelos demais autores.

Figura 2

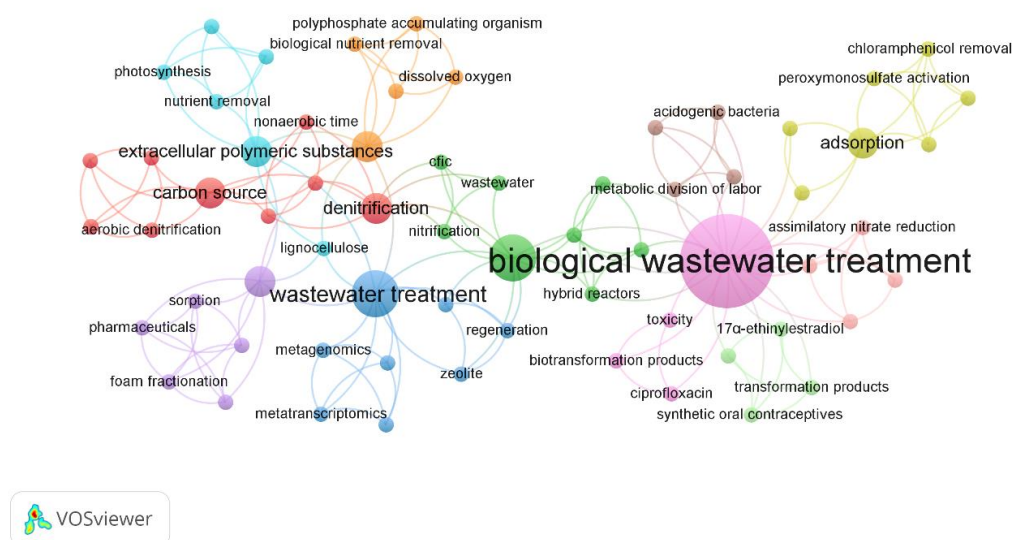
Rede de citações entre artigos sobre tratamentos biológicos utilizando o VOSviewer.



Por meio das publicações avaliadas, é possível determinar a frequência com que específicas palavras-chave são citadas em artigos que abordam diferentes temáticas. Estejam elas presentes no título, resumo ou palavras-chave (Van Eck e Waltman, 2017). Dessa forma, é possível identificar e quantificar quais termos norteiam a discussão trabalhada nos documentos utilizados (Machado Junior *et al.*, 2016). Observando a Figura 3, que evidência quais temáticas receberam notoriedade e quais foram menos abordadas, conclui-se que a palavra-chave mais citada pelos autores dos estudos englobados nesta revisão é “biological wastewater treatment”, seguida da palavra “wastewater treatment”, presentes em todas as outras publicações referenciadas nesta consulta, e que estão direta ou indiretamente atreladas aos outros eixos apresentados na figura em menor ocorrência, conforme verifica-se o nó entre elas.

Figura 3

Rede de coocorrência de palavras-chave utilizadas pelos autores do estudo.

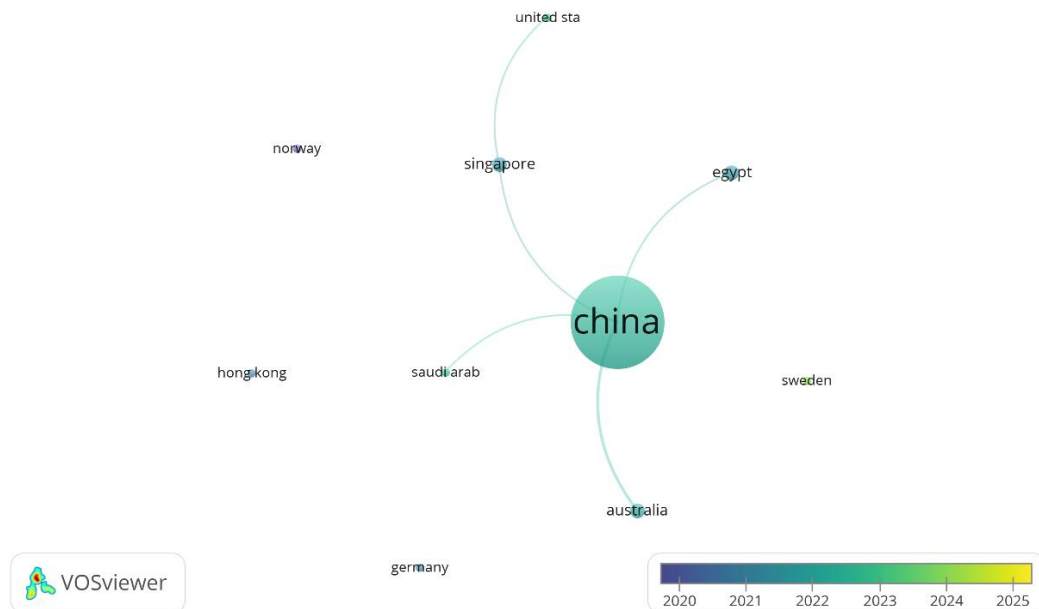


Ao todo, onze grupos de palavras foram identificados, e são diferenciados por cores (Figura 3). Dentre eles, três apresentam maior co-ocorrência com as demais palavras-chave identificadas. Cada um destes três grupos apresenta uma palavra-chave em destaque, que se conecta às respectivas palavras que compõem aquele grupo em específico e se conectam aos demais, como visualizado pelo alcance dos nós.

O grupo que estão contidas as palavras-chave “metagenomics”, “regeneration”, “zeolite”, “metatranscriptomics” e “wastewater treatment”, dentre as quais destaca-se “wastewater treatment”; engloba trabalhos como os de Hossain *et al.* (2022), que estuda o efeito da adição de materiais no beneficiamento do tratamento. No grupo com as palavras-chave “wastewater”, “nitrification”, “cfc” e “hybrid reactors”, temos a relação com trabalhos como os de Rathnaweera *et al.* (2020), que aborda a combinação de métodos para obter um tratamento eficiente. O grupo que detém a palavra-chave mais citada, “biological wastewater treatment”, conta com quatro palavras, sendo as outras três “toxicity”, “biotransformation products” e “ciprofloxacin”. Estas palavras-chave se relacionam com trabalhos como o de Zhang *et al.* (2022), que avalia a biodegradação de fármacos.

Figura 4

Coautoria e países.



A Figura 4 retrata a coautoria entre países, é notável que dos 10 países responsáveis pela produção acadêmica dos artigos, a maior parte das publicações englobadas na proposta desta revisão concentram-se na China, que apresenta relação direta com a Austrália, Arábia Saudita, Egito e Singapura. Quanto mais próximo à cor amarela, mais recente é a publicação da pesquisa, assim, é possível concluir que nos últimos anos poucas pesquisas foram realizadas no contexto abordado por esta revisão. Em comparação com a quantidade de artigos publicada no ano de 2025, apenas um, o ano de 2023 ganha notoriedade pela grande quantidade de publicações dentre todo o período analisado, contando com 10 trabalhos publicados na área delineada pela pesquisa, liderados pela China.

Revisão Sistemática

Ao investigar os efeitos da presença da lignocelulose no tratamento de águas residuárias, Xu *et al.* (2023) perceberam estabilidade no lodo granular aeróbio e na comunidade bacteriana, favorecendo a conversão nos processos de nitrificação, para um valor <5 mg/L em 60 minutos. Além de taxas de liberação e acúmulo de fósforo em 2,28 e 3,20 mgP/gMLSS, respectivamente.

Efeitos positivos na comunidade bacteriana também foram obtidos por Chen *et al.* (2022) pelo uso de segmentos do bagaço de cana-de-açúcar em um reator de batelada sequencial simulado. Servindo como uma fonte adicional de carbono para bactérias desnitrificantes, melhorando a remoção de nutrientes por superar a baixa relação Carbono/Nitrogênio, foi obtido um aumento na taxa de remoção de nitrogênio de 35,20 mg/L.h, sendo 7,40 vezes maior em comparação ao tratamento com lodo ativado bruto. A DQO ficou estabilizada abaixo de 50 mg/L.

Qin *et al.* (2023) também perceberam a influência das fontes de carbono no tratamento ao comparar qual reator, baseado em processo de hidrólise de lodo ativado por fluxo lateral (SSH) ou anaeróbio/anóxico/aeróbio (A^2O), é mais eficiente em diferentes concentrações de oxigênio dissolvido. O melhor desempenho do reator SSH, em parte, está atrelado às fontes extras de carbono geradas pela fermentação do lodo, que promoveu a remoção de 89 a 91% de amônia e 71 a 85% de nitrogênio total. Em níveis moderados de oxigênio dissolvido (2,2 a 3,9 mg/L) a remoção de fosfato atingiu 96,0%, além de aumentar a presença de microrganismos fermentativos e acumuladores de polifosfatos.

Resultado similar para a remoção de fosfato e amônio foi obtido por Peng *et al.* (2023), que por meio do aumento no tempo de retenção hidráulica não aeróbia, de 0 para 4 horas, com tempo de retenção hidráulica aeróbia constante a 8 horas, conseguiram a remoção de mais de 90% de fosfato e amônio.

Um outro tipo de comparação foi realizada por Zhang *et al.* (2020), utilizando o Ânodo de Janus Fototérmico (PTJA), que atua no transporte das águas residuárias e na transmissão de luz de maneira separada, por duas camadas assimétricas que possui, a fim de melhorar o tratamento biológico, prejudicado em baixas temperaturas ($< 10^{\circ}C$). Foi obtida uma eficiente conversão de luz em calor e remoção de 82,2% de DBO, que é 1,6 vezes maior em comparação com sistemas fototérmicos que usam ânodos tradicionais.

A persistência de contaminantes como fármacos após o tratamento, foi estudada por Burzio *et al.* (2024), que procuraram entender seu comportamento durante o processo de sorção em biomassa e na espuma gerada pela aeração. Foi identificada a remoção de 20% da concentração de nove fármacos: citalopram, claritromicina, eritromicina, estradiol, etinilestradiol, cetoconazol, levonorgestrel, losartan e sertralina. Além disso, os autores alertaram para a afinidade dos fármacos pela espuma gerada.

Alerta similar foi dado por Weizel *et al.* (2021), que ao avaliar a presença e degradação de progestágenos, com enfoque na persistência de seus subprodutos em tratamento com lodo

ativado, destacaram a importância da avaliação do descarte do efluente, uma vez que o tratamento observado não conseguiu inativar os efeitos deletérios dos produtos de transformação.

Qian *et al.* (2023) também voltaram seus olhares para a remoção de fármacos fazendo uso de Peroximonosulfato (PPS) em uma concentração limite de 6,2 mM, ativado com biochar de lodo petroquímico produzido a 800°C e posteriormente submetido a ativação pelo composto KOH, assim, conseguiram obter 97,5% de remoção do antibiótico cloranfenicol, entretanto, testes em escala real ainda são necessários.

Em consonância, avaliando a biodegradação de SMX (sulfametoxazol), mediando o processo biológico por enxofre, Zhang *et al.* (2023) obtiveram uma remoção do fármaco por meio de biodegradação específica, de $0,2 \pm 0,07$ para $8,1 \pm 0,2$ µg/g-SS/h, e uma maior remoção de DQO e conversão de sulfatos, $93,1 \pm 0,6\%$ e $65,6 \pm 0,7\%$, respectivamente, numa alta concentração de SMX (1000 µg/L). No ano anterior, Zhang *et al.* (2022) também avaliaram a biodegradação do fármaco ciprofloxacina em três sistemas com lodo ativado, um deles mediado por enxofre; obtendo uma excelente remoção do antibiótico, atingindo $1,52 \pm 0,02$ mg/g-SS/d, além de $91,6 \pm 0,5\%$ de DQO e $69,7 \pm 1,2\%$ de sulfato.

Os estudos de Fang *et al.* (2020) voltaram-se para o monitoramento do uso de componentes químicos, como o desacoplador metabólico o-clorofenol, que objetiva a redução da produção de lodo. Dosagens de 5; 10; 15 e 20 mg/L de oCP promoveram a redução de lodo em 17,40%; 25,80%; 33,02% e 39,50%, respectivamente. Porém, reduzem a eficiência na remoção de poluentes, como DQO, de $94,22 \pm 2,83\%$ para $80,40 \pm 4,02\%$, e nitrogênio, de 8,67% para 3,85%. Da mesma forma, o estudo de Wang *et al.* (2022) também constatou os efeitos que o mesmo componente exerce na redução de lodo, $56,1 \pm 2,3\%$, além do destaque negativo para a remoção de nitrogênio e fósforo, que foi reduzida para $33,2 \pm 0,4\%$ e $79,6 \pm 1,2\%$, respectivamente.

O problema da baixa eficiência na remoção de nutrientes em prol da redução de lodo, abordado por Pressa *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2022), encontrou uma alternativa no consórcio entre os reatores de lise de lodo e de lodo ativado, abordado por Chi *et al.* (2023), onde um reator com lodo lisado por bactérias termofílicas foi integrado a um reator de lodo ativado em batelada sequencial. Isso levou à redução de lodo em comparação com reator convencional, DQO e nitrogênio total a 81,5%; 94,0% e 80,5%, respectivamente, além de maior diversidade bacteriana, comunidade microbiana biodegradadora e lise de lodo.

Ainda nessa direção de consórcio entre reatores, Hassan *et al.* (2020), avaliaram os efeitos da operação combinada de um reator híbrido de reator de biofilme de leito móvel (MBBR) associado ao processo de lodo ativado (CAS) por 12 meses, e puderam comprovar a eficiência da abordagem pela remoção de $33,00 \pm 8,87 \text{ mgL}^{-1}$; $52,90 \pm 9,65 \text{ mgL}^{-1}$ e $29,50 \pm 6,64 \text{ mgL}^{-1}$ de DBO₅; DQO e SST, respectivamente.

Uma outra combinação foi apresentada por Sun *et al.* (2024), através do processo de acoplamento MBGS-MA, que consiste no consórcio entre lodo granular microalga-bactéria (MBGS) e Marimo (MA), levando à remoção de DQO; nitrogênio e fósforo total, em 75,4%; 83,4% e 87,4%, respectivamente, por meio da colaboração entre os microrganismos.

Ainda sobre o uso de biofilmes, Hossain *et al.* (2022), em escala de testes, propuseram o uso de biofilme modificado com zeólita dominado por organismos acumuladores de glicogênio. Esta abordagem levou à remoção satisfatória, em um curto espaço de tempo, de $1354 \text{ g.m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ de DQO e $79,1 \text{ g.m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ de nitrogênio.

Rathnaweera *et al.* (2020), classificam o processo de Limpeza Intermitente de Fluxo Contínuo (CFIC-Mem) como uma melhoria do tratamento por Reator de Biofilme de Leito Móvel. Estudando seu efeito na remoção de contaminantes de dois tipos de águas residuais: águas residuais peneiradas e desarenadas (SDWW) e águas residuais tratadas primárias (PTWW), foi constatada a remoção de 67% e 58% de nitrogênio e 94% e 87% de DQO em SDWW e PTWW, respectivamente.

Valores menores de redução de DQO; nitrato e Nitrogênio Total, $14,91 \text{ mg/L}$; $6,68 \pm 1,55 \text{ mg/L}$ e $10,45 \pm 2,73 \text{ mg/L}$, respectivamente, foram obtidos por Fu *et al.* (2023) ao avaliarem os efeitos do uso de um segregador de membrana experimental no beneficiamento de remoção de contaminantes.

O uso de substâncias químicas inorgânicas no tratamento de águas residuárias, como o sal Fe^{3+} , foi investigado por Zhang *et al.* (2021), que o utilizaram como floculante para aglomerar e sedimentar sólidos suspensos e identificaram a ação removedora de poluentes. Em uma concentração igual a 10 mg.L^{-1} em sistema A²O, houve redução em 97% de DQO e 89% de Nitrogênio Total. Quando a concentração do sal variou de 0 para 40 mg.L^{-1} , houve aumento na remoção de fósforo de 69% para 97%.

Uma outra espécie química, o ferro zero-valente, foi utilizada por Wang e Li (2023) para remover o hormônio sintético 17α -etinilestradiol. A espécie foi capaz de promover eficiente média geral de remoção de $45,56 \pm 15,75\%$. Além de oferecer menor risco de emissão de óxido

nitroso (N_2O) em condições anaeróbicas ($6,84 \pm 0,52$ ppm) e enriquecimento de *Arenimonas* que são potenciais degradadores de contaminantes emergentes. Seshan *et al.* (2023) também notaram a ação degradadora de comunidades microbianas, neste caso, as do gênero OLB8, quando avaliaram os efeitos da incidência do contaminante 3-cloroanilina durante o tratamento de esgoto.

Liu *et al.* (2020), optaram pelo uso da substância inorgânica $\text{H-La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ (adsorvente inorgânico à base de lantânio), e verificaram que uma adequada concentração do composto (40 mg/L) durante 40 dias, leva ao aumento de organismos acumuladores de polifosfatos, garantindo remoção de 96,4% fósforo total, além da floculação do lodo.

Shi *et al.* (2025), avaliaram a atividade de microalgas em busca de uma melhor remoção de nutrientes, em especial compostos nitrogenados. Eles identificaram que fertilizá-las com bicarbonato variável (NaHCO_3) em uma quantidade de (0,05 M) promove o aumento de 76,6% da biomassa das microalgas, e a absorção de nutrientes. Isso resultou na remoção de compostos nitrogenados em 21,3% e fosforados em 11,9%.

Outro material utilizado, aliado à ação de microrganismos, neste caso, hidrogel biológico de grafeno produzido em conjunto com a bactéria *Shewanella putrefaciens* CN32, foi estudado por Hua *et al.* (2023), em prol da remoção dos corantes Laranja de Metilo e Azul de Metileno, obtendo remoção de 92,9% e 91%, respectivamente. Isso é devido à capacidade do material produzido acelerar a transferência de elétrons extracelulares e favorecer vias de biodegradação dos corantes, por meio da interação com a bactéria.

A proposta de monitorar comunidades microbianas no sistema de tratamento, para identificar um mau funcionamento de acordo com a presença de gêneros específicos dessas comunidades, foi um viés adotado por Yu *et al.* (2021). $50,2 \pm 14,3$ % e $20,9 \pm 7,6$ % correspondem a Proteobactérias e Bacteroidetes, respectivamente, que são os gêneros dominantes na estação de tratamento. Destes, proteobactérias estão diretamente ligadas à remoção de nutrientes e lideram também como generalistas. 67,2% dos gêneros identificados são transitórios e 26,1% especialistas.

CONCLUSÃO

A análise realizada, identificou as palavras-chave “*biological wastewater treatment*” e “*wastewater treatment*” como mais utilizadas e os anos de 2020 e 2023 com o maior número de publicações, 5 e 10, respectivamente. Além disso, a China se destacou como país com produções

científicas relacionadas ao tema, principalmente no ano de 2023. Notavelmente, o Brasil não contribuiu com publicações dentro do escopo definido por esta análise bibliométrica durante o período considerado.

As pesquisas evidenciaram a preocupação em obter um tratamento biológico eficiente e sustentável, de modo a minimizar os impactos ambientais causados pelas substâncias presentes nos efluentes domésticos e, conseqüentemente, possibilitar seu reúso em diversos setores, como o agrícola. Cada tratamento empregado conseguiu promover redução, remoção ou conversão de algum contaminante, como: DQO; DBO; fármacos; corantes; lodo; compostos nitrogenados e fosforados, assim como promover a redução de energia. Entretanto, estudos como os de Weizel *et al.* (2021); (Zhang *et al.* 2022; 2023) e Burzio *et al.* (2024) retratam a necessidade de mais estudos e aprimoramento do tratamento em virtude da presença de subprodutos dos contaminantes, que representam riscos para o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- Aragão Júnior, W. R., & Oliveira Júnior, A. I. (2021). Internet das coisas na gestão de resíduos sólidos: revisão sistemática com análise bibliométrica da literatura. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 6, 194–209.
- Burzio, C., Mohammadi, A. S., Smith, S., Abadikhah, M., Svahn, O., Modin, O., Persson, F., & Wilén, B.-M. (2024). Sorption of pharmaceuticals to foam and aerobic granular sludge with different morphologies. *Resources, Environment and Sustainability*, 15, 100149.
- Camilo, C., & Garrido, M. V. (2019). A revisão sistemática de literatura em psicologia: desafios e orientações. *Análise Psicológica*, (4), 535–552.
- Cantelle, T. D., Lima, E. C., & Borges, L. A. C. (2018). Panorama dos recursos hídricos no mundo e no Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 11(4), 1259–1282.
- Chen, M., Tang, Q., Zou, J., Lv, X., Deng, Y., Ma, X., & Ma, S. (2022). Sugarcane bagasse as carbon source and filler to enhance the treatment of low C/N wastewater by aerobic denitrification flora. *Water*, 14(21), 3355.
- Chi, B., Huang, Y., Xiong, Z., Tan, J., Zhou, W., Yang, Z., Zhou, K., Duan, X., Chen, A., & Gui, K. (2023). Combination of sequencing batch reactor activated sludge process with sludge lysis using thermophilic bacterial community for minimizing excess sludge. *Journal of Environmental Management*, 345, 118902.
- Dantas, M. S., Freitas, D. L., Ferreira, L. O., Neves, P. N. P., & Oliveira, S. (2022). Avaliação de dados de monitoramento de estações de tratamento de esgotos domésticos operando com reatores UASB, localizadas na bacia hidrográfica do Rio das Velhas (MG), Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27(4).

- Fang, F., Wang, S.-N., Li, K.-Y., Dong, J.-Y., Xu, R.-Z., Zhang, L.-L., Xie, W.-M., & Cao, J.-S. (2020). Formation of microbial products by activated sludge in the presence of a metabolic uncoupler o-chlorophenol in long-term operated sequencing batch reactors. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121311.
- Fu, Y., Xu, R., Yang, B., Wu, Y., Xia, L., Tawfik, A., & Meng, F. (2023). Mediation of bacterial interactions via a novel membrane-based segregator to enhance biological nitrogen removal. *Applied and Environmental Microbiology*, 89, e00709-23.
- Guo, Z., Tang, X., Wang, W., Luo, Z., Zeng, Y., Zhou, N., Yu, Z., Wang, D., Song, B., Zhou, C., & Xiong, W. (2025). The photo-based treatment technology simultaneously removes resistant bacteria and resistant genes from wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 148, 243–262.
- Hassan, K., Hamdy, O., Helmy, M., & Mostafa, H. (2020). Enhancing treated wastewater effluent characteristics using hybrid biofilm/activated sludge process – a case study. *Water Science and Technology*, 81(2), 217–227.
- Hossain, M. I., Cheng, L., & Cord-Ruwisch, R. (2022). Sustained and enhanced anaerobic removal of COD and nitrogen in a zeolite amended glycogen accumulating organism dominated biofilm process. *Science of the Total Environment*, 807(Part 1), 150602.
- Hua, Z., Tang, L., Wu, M., & Fu, J. (2023). Graphene hydrogel improves *S. putrefaciens*' biological treatment of dye wastewater: Impacts of extracellular electron transfer and function of c-type cytochromes. *Environmental Research*, 236(Part 1), 116739.
- Liu, B., Nan, J., Zu, X., Zhang, X., Huang, W., & Wang, W. (2020). La-based-adsorbents for efficient biological phosphorus treatment of wastewater: Synergistically strengthen of chemical and biological removal. *Chemosphere*, 255, 127010.
- Machado Junior, C., Souza, M. T. S., Parisotto, I. R. S., & Palmisano, A. (2016). As leis da bibliometria em diferentes bases de dados científicos. *Revista de Ciências e Administração*, 18(44), 111–123.
- Marçal, D. A., & Silva, C. E. (2017). Avaliação do impacto do efluente da estação de tratamento de esgoto ETE-Pirajá sobre o Rio Parnaíba, Teresina (PI). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(4).
- Organização das Nações Unidas. (n.d.). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Recuperado em 16 de abril de 2025, de <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>
- Peng, Z., Meng, F., Zhang, W., Ji, J., Huang, Z., Gu, L., & Liu, B. (2023). Evaluating the effect of nonaerobic hydraulic retention time on nutrients removal in nonaerobic and aerobic SBR. *Journal of Environmental Engineering*, 149(8).
- Qian, L., Yan, S., Yong, X., Selvaraj, M., Ghramh, H. A., Assiri, M. A., Zhang, X., Awasthi, M. K., & Zhou, J. (2023). Effective degradation of chloramphenicol in wastewater by activated peroxymonosulfate with Fe-rich porous biochar derived from petrochemical sludge. *Chemosphere*, 310, 136839.

- Qin, L., Wang, D., Zhang, Z., Li, X., Chai, G., Lin, Y., Liu, C., Cao, R., Song, Y., Meng, H., Wang, Z., Wang, H., Jiang, C., Guo, Y., Li, J., & Zheng, X. (2023). Impact of Dissolved Oxygen on the Performance and Microbial Dynamics in Side-Stream Activated Sludge Hydrolysis Process. *Water*, 15(11), 1977.
- Rathnaweera, S. S., Rusten, B., Manamperuma, L. D., Wang, S., & Helland, B. (2020). Innovative, compact and energy-efficient biofilm process for nutrient removal from wastewater. *Water Science and Technology*, 81(9), 1941–1950.
- Race, M., Ferraro, A., Galdiero, E., Guida, M., Núñez-Delgado, A., Pirozzi, F., Siciliano, A., & Fabbicino, M. (2020). Current emerging SARS-CoV-2 pandemic: Potential direct/indirect negative impacts of virus persistence and related therapeutic drugs on the aquatic compartments. *Environmental Research*, 188, 109808.
- Seshan, H., Santillan, E., Constancias, F., Chandra Segaran, U. S., Williams, R. B. H., & Wuertz, S. (2023). Metagenomics and metatranscriptomics suggest pathways of 3-chloroaniline degradation in wastewater reactors. *Science of The Total Environment*, 903, 166066.
- Shi, S., Zhang, Y., Lin, S., Zhang, M., Zou, W., Zhou, J., & Wang, Y. (2025). Deciphering the promotion and inhibition of bicarbonate fertilization on microalgal activity and nutrient uptake from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 378, 124810.
- Sousa, A. S., Oliveira, S. O., & Alves, L. H. (2021). A pesquisa bibliográfica: Princípios e fundamentos. *Cadernos da FUCAMP*, 20(43), 64–83.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2017). Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, 111, 1053–1070.
- Wanner, J. (2021). The development in biological wastewater treatment over the last 50 years. *Water Science and Technology*, 84(2), 274–283.
- Wang, L., & Li, A. (2023). Impact of zero-valent iron on nitrifying granular sludge for 17 α -ethinylestradiol removal and its mechanism. *Chemosphere*, 333, 138904.
- Wang, S.-N., Fang, F., Li, K.-Y., Yue, Y.-R., Xu, R.-Z., Luo, J.-Y., Ni, B.-J., & Cao, J.-S. (2022). Sludge reduction and microbial community evolution of activated sludge induced by metabolic uncoupler o-chlorophenol in long-term anaerobic-oxic process. *Journal of Environmental Management*, 316, 115230.
- Weizel, A., Schlüsener, M. P., Dierkes, G., Wick, A., & Ternes, T. A. (2021). Fate and behavior of progestogens in activated sludge treatment: Kinetics and transformation products. *Water Research*, 188, 116515.
- Xu, J., Gao, Y., Bi, X., Li, L., Xiang, W., & Liu, S. (2023). Positive effects of lignocellulose on the formation and stability of aerobic granular sludge. *Frontiers in Microbiology*, 14, Article 1254152.
- Yu, J., Tang, S. N., & Lee, P. K. H. (2021). Microbial communities in full-scale wastewater treatment systems exhibit deterministic assembly processes and functional dependency over time. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 5312–5323.

- Zahmatkesh, S., Amesho, K. T. T., & Sillanpää, M. (2022). A critical review on diverse technologies for advanced wastewater treatment during SARS-CoV-2 pandemic: What do we know? *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100121.
- Zhang, H., Quan, H., Song, S., Sun, L., & Lu, H. (2023). Comprehensive assessment of toxicity and environmental risk associated with sulfamethoxazole biodegradation in sulfur-mediated biological wastewater treatment. *Water Research*, 246, 120753.
- Zhang, H., Quan, H., Yin, S., Sun, L., & Lu, H. (2022). Unraveling the toxicity associated with ciprofloxacin biodegradation in biological wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, 56(22).
- Zhang, J., Wang, W., You, S., Qi, D., Liu, Z., Liu, D., Ma, M., Cui, F., Ren, N., & Chen, X. (2020). Photothermal Janus anode with photosynthesis-shielding effect for activating low-temperature biological wastewater treatment. *Advanced Functional Materials*, 30(7), 1909432.
- Zhang, L., Zhang, M., You, S., Ma, D., Zhao, J., & Chen, Z. (2021). Effect of Fe^{3+} on the sludge properties and microbial community structure in a lab-scale A2O process. *Science of The Total Environment*, 780, 146505.