



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL
MESTRADO ACADÊMICO EM SOCIOBIODIVERSIDADE E TECNOLOGIAS
SUSTENTÁVEIS**

ÉVERTON DEÂNGELES LOPES DA SILVA

**PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS NO USO DE MICROALGAS PARA
BIOENERGIA E TRATAMENTO DE ÁGUAS**

REDENÇÃO – CE

2025

ÉVERTON DEÂNGELES LOPES DA SILVA

**PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS NO USO DE MICROALGAS PARA
BIOENERGIA E TRATAMENTO DE ÁGUAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira, UNILAB – Campus das Auroras.

Linha de pesquisa: Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. John Herbert da Silva Félix

REDENÇÃO – CE

2025

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Silva, Éverton Deângeles Lopes da.

S586p

Perspectivas e tendências no uso de microalgas para bioenergia e tratamento de águas / Éverton Deângeles Lopes da Silva. - Redenção, 2025.

65f: il.

Dissertação - Curso de Sociobiodiversidade E Tecnologias Sustentáveis, Programa De Pós-graduação Sociobiodiversidade E Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2025.

Orientador: Prof. Dr. John Herbert da Silva Félix.

1. Microalga. 2. Bioenergia. 3. Águas residuais. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 579.8

ÉVERTON DEÂNGELES LOPES DA SILVA

**PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS NO USO DE MICROALGAS PARA
BIOENERGIA E TRATAMENTO DE ÁGUAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira, UNILAB – Campus das Auroras.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. John Herbert da Silva Félix – Orientador

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Prof. Dr. José Cleiton Sousa dos Santos – Externo ao programa

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Prof. Dra. Rita Karolinny Chaves de Lima – Externa ao programa

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Prof. Dra. Juliana de França Serpa – Externa ao programa

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, o Criador, por ter guiado meus passos e cuidado de mim em todos os momentos dessa jornada. Sem Sua presença e proteção, nada disso seria possível.

À minha esposa, Aslana Nargila, meu eterno obrigado. Você foi minha base, me ajudando em vários momentos desta jornada e me motivando a sempre continuar. Seu apoio incondicional e amor foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Aos meus amados filhos, William Deângeles e Giovanna, vocês são minha inspiração diária e a razão pela qual busco sempre o melhor.

Aos meus pais, Antonio e Elilda, minha gratidão por todo o apoio, incentivo e torcida ininterrupta. Vocês sempre estiveram ao meu lado, e isso fez toda a diferença. À minha irmã Elida, suas filhas Ellen e Emilly, e ao seu esposo Wítalia, obrigado por todo o carinho e pela energia positiva que sempre me transmitiram.

Ao meu orientador, John Hebert, sou imensamente grato por toda a paciência, compreensão e direcionamento ao longo desse processo. Sua dedicação e sabedoria foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Muito obrigado por acreditar em mim e por estar sempre disposto a ajudar.

Aos professores José Cleiton e Karolinny Chaves, meu sincero agradecimento pelo compartilhamento de conhecimentos e pelo apoio constante. Suas orientações foram valiosas e contribuíram significativamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos da Unilab, Caike, William, Izaias e Lucas, obrigado pelas risadas, pelos momentos de descontração e pelo apoio nos momentos mais desafiadores. Vocês tornaram essa caminhada mais leve e especial.

Por fim, à Unilab, instituição que carrego no coração. Aqui concluí minha graduação e agora finalizo meu mestrado. Tenho um carinho imenso por essa universidade, que me acolheu e me permitiu crescer tanto pessoalmente quanto profissionalmente. Espero um dia retornar, desta vez como professor, para contribuir com essa comunidade que tanto respeito e admiro.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, meu muito obrigado. Este trabalho é fruto de muitas mãos, corações e mentes que estiveram comigo ao longo desse caminho.

RESUMO

Este estudo realiza uma revisão bibliométrica e sistemática sobre as aplicações das microalgas na produção de bioenergia e no tratamento de águas residuais. O objetivo é mapear tendências de pesquisa, avanços tecnológicos e desafios dessa área. Foram analisados 426 documentos indexados na Web of Science e Scopus, publicados entre 2014 à 2024, utilizando VOSviewer e Bibliometrix para examinar redes de colaboração, impacto científico e evolução das publicações. Os resultados mostram um crescimento expressivo de 172,2% nas pesquisas, com China e Índia se destacando como líderes no setor. A análise de patentes revela inovações em sistemas de cultivo, otimização da biomassa e métodos aprimorados para tratamento de efluentes. As microalgas apresentam alta eficiência na absorção de nutrientes e remoção de metais pesados, promovendo a purificação da água enquanto acumulam biomassa rica em lipídios e carboidratos – essenciais para a produção de biodiesel e biohidrogênio. Os métodos de cultivo mais utilizados foram fotobiorreator e tanques a céu aberto. As microalgas mais utilizadas foram a *Chlorella vulgaris* e a *Scenedesmus sp.* Além disso, a integração das microalgas com sistemas híbridos e outras abordagens biotecnológicas pode aumentar a eficiência energética, reduzir custos e impulsionar sua viabilidade comercial. Como solução sustentável, esses microrganismos têm potencial para competir com tecnologias convencionais de tratamento de efluentes e contribuir para a diversificação da matriz energética. O contínuo avanço das pesquisas reforça o papel estratégico das microalgas na transição energética e na gestão sustentável da água, consolidando-se como uma alternativa promissora para mitigar impactos ambientais e ampliar o uso de bioenergia renovável.

Palavras chaves: Microalga; Águas Residuais; Bioenergia; Análise bibliométrica.

ABSTRACT

This study conducts a bibliometric and systematic review on the applications of microalgae in bioenergy production and wastewater treatment. The objective is to map research trends, technological advancements, and challenges in this field. A total of 426 documents indexed in Web of Science and Scopus were analyzed, published between 2014 and 2024, using VOSviewer and Bibliometrix to examine collaboration networks, scientific impact, and the evolution of publications. The results show a significant growth of 172.2% in research, with China and India standing out as leaders in the sector. Patent analysis reveals innovations in cultivation systems, biomass optimization, and improved methods for effluent treatment. Microalgae demonstrate high efficiency in nutrient absorption and heavy metal removal, promoting water purification while accumulating biomass rich in lipids and carbohydrates essential for biodiesel and biohydrogen production. The most commonly used cultivation methods were photobioreactors and open ponds. The most widely used microalgae were *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus sp.* Furthermore, the integration of microalgae with hybrid systems and other biotechnological approaches can increase energy efficiency, reduce costs, and enhance their commercial viability. As a sustainable solution, these microorganisms have the potential to compete with conventional effluent treatment technologies and contribute to the diversification of the energy matrix. The continuous advancement of research reinforces the strategic role of microalgae in the energy transition and sustainable water management, establishing them as a promising alternative to mitigate environmental impacts and expand the use of renewable bioenergy.

Keywords: Microalgae; wastewater; Bioenergy; Bibliometric analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo metodológico utilizado na revisão bibliométrica.....	13
Figura 2. Número de publicações dos países mais relevantes.....	14
Figura 3. Número de citações dos países mais relevantes.....	15
Figura 4. Mapa de rede de colaboração entre os principais países.....	16
Figura 5. Número de publicações para as 10 principais revistas.....	17
Figura 6. Percentual dos tipos de documentos selecionados na revisão bibliométrica ..	22
Figura 7. Agrupamento das principais palavras chaves e suas conexões.....	24
Figura 8. Nuvem com as principais palavras chaves.....	25
Figura 9. Gráfico de três campos mostrando a interconexão entre os principais países, as principais palavras chaves e as conexões com as principais universidades	25
Figura 10. Mapa temático dividido em quadrantes	26
Figura 11. Principais aplicações de microalgas.....	29
Figura 12. Número anual de famílias de patentes	41
Figura 13. Painel com principais análises de patentes (A). Top 10 dos países com maior número de patentes; (B). Top 10 dos países com maior número de inventores; (C). Top 10 dos inventores mais relevantes; (D). Top 10 dos principais requerentes de patentes.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Número de citações para as 10 principais revistas.....	18
Tabela 2. Top 10 das publicações mais citadas.....	19
Tabela 3. Top 10 das palavras chaves com maior frequência.....	23
Tabela 4. Os 10 principais artigos experimentais conforme número de citações.....	31
Tabela 5. Exemplos de estudos para cada tipo de produto bioenergético obtido	38
Tabela 6. As 10 patentes mais relevantes na área	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral	10
2.2 Objetivos específicos.....	11
3 METODOLOGIA	11
3.1 Banco de dados.....	11
3.2 Coleta de dados.....	11
3.3 Extração de dados.....	12
3.4 Visualização e análise de dados.....	12
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
5.1 Revisão Bibliométrica	14
5.1.1 Países.....	14
5.1.2 Revistas.....	16
5.1.3 Documentos.....	18
5.1.4 Palavras-chave.....	22
5.1.5 Tendências temáticas	26
5.2 Visão geral sobre microalgas.....	28
5.2.1 Características e tipos de microalgas.....	28
5.2.2 Tecnologias de cultivo	33
5.2.3 Uso de microalgas no tratamento de águas residuais e geração de bioenergia	34
6. PONTOS FORTES E LIMITAÇÕES	40
7. PATENTES EM TECNOLOGIAS BASEADAS EM MICROALGAS.....	41
8. OPORTUNIDADES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS	49
9. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética, e a perspectiva de escassez para as próximas gerações, emitiram um alerta quanto à necessidade de se buscar novas tecnologias eficientes na produção de energia(Sanches *et al.*, 2020)(Abed *et al.*, 2025)(Nassar; El-Khozondar; Fakher, 2025). Os problemas ambientais ganham cada vez mais notoriedade, pois o aumento de emissão de CO₂ é significativo e preocupante, os combustíveis fósseis são responsáveis pela maior parcela de emissão de gases poluentes, o que tem impulsionado uma busca global por fontes alternativas e renováveis de energia (Araújo, Raiane Sodré de *et al.*, 2022)(Pea-Assounga *et al.*, 2025)(Ye; Li; Li, 2023)(Hassan *et al.*, 2024).

São consideradas energias renováveis, aquelas que são provenientes de fontes que possam garantir um futuro sustentável, oriundos de recursos naturais e que se renovam, possibilitando uma utilização contínua. São exemplos de fontes renováveis as provenientes de fonte solar, eólica, hidrelétrica e os biocombustíveis (Krell; De Castro E Souza, 2020)(Oliveira; Mario; Pacheco, 2021). A bioenergia emerge como uma solução promissora, especialmente por possuir a capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, e conseqüentemente auxiliando na busca pela redução da dependência de combustíveis fósseis (Huch Duarte *et al.*, 2022)(Egler; Barbieri, 2024)(Banerjee *et al.*, 2023) .

As microalgas surgem como uma ótima e promissora opção de matéria-prima para a produção de energia renovável, visto que ela possui alta produtividade de biomassa, contando com uma elevada taxa de crescimento e capacidade de se desenvolver em ambientes variados, sem competir com culturas alimentares(Najeeb *et al.*, 2024)(Zhou, Yingdong *et al.*, 2025). Outro fator importante, é que as microalgas podem ser cultivadas em terras não aráveis, e ainda podem ser cultivadas em águas residuais seja doméstico, urbano ou industrial, o que se apresenta como uma alternativa econômica e ambientalmente vantajosa, já que reduz a necessidade de fertilizantes químicos, frequentemente utilizados em cultivos convencionais de microalgas, e ainda contribui para a remediação de águas contaminadas (Guerra *et al.*, 2024)(Dou *et al.*, 2025)(Palandi; Taghavijelouidar, 2024).

As microalgas são organismos unicelulares que podem realizar a fotossíntese, convertendo dióxido de carbono e luz solar em biomassa e óleos, possuindo diversas aplicações como por exemplo, a sua aplicação na indústria farmacêutica, na produção de biossurfactantes, no tratamento de efluentes(Hamidian; Zamani, 2022)(Josa; Garfi, 2023)

ou na produção de biocombustíveis(Liu *et al.*, 2025)(Ali *et al.*, 2022). Diversos novos estudos estão sendo realizados visando a ampliação de sua utilização, dentre estes estudos, busca-se fortemente a efetiva melhoria na produção de biocombustíveis, como por exemplo, o biodiesel e o hidrogênio (Moraes *et al.*, 2023) (Filipe *et al.*, 2025).

justificativa

As microalgas possuem a capacidade de absorver nutrientes presentes nas águas residuais, como nitrogênio e fósforo, que são elementos poluentes em corpos hídricos. Esse processo não apenas promove o crescimento das microalgas, mas também reduz os impactos negativos causados pela eutrofização, um dos principais problemas ambientais associados ao descarte inadequado de efluentes(Raza; Ramzan; Yang, 2025)(Xu *et al.*, 2024)(Martinez-Villarreal *et al.*, 2022). Esse duplo benefício, de geração de energia e mitigação de impactos ambientais, posiciona as microalgas como uma solução inovadora e estratégica frente às demandas globais por alternativas sustentáveis(Arashiro *et al.*, 2022)(Tomar *et al.*, 2023).

O uso de microalgas representa um impacto global significativo, oferecendo soluções inovadoras para dois grandes desafios ambientais: a poluição da água e a escassez de fontes de energia sustentável(Pessoa *et al.*, 2022). Em termos de bioenergia, elas surgem como uma alternativa renovável de grande potencial, atuando diretamente na redução das emissões de gases de efeito estufa e atenuando a dependência de combustíveis fósseis (Calijuri *et al.*, 2022)(Raeisi *et al.*, 2023)(Najiha Badar *et al.*, 2021). Logo, o cultivo de microalgas e sua aplicação, pode ser uma resposta eficiente à crescente demanda por energia limpa, atuando até mesmo no campo do tratamento de águas residuais, desempenhando assim um papel essencial na purificação de águas poluídas, absorvendo nutrientes e metais pesados, recuperando valiosos recursos, como fósforo e nitrogênio(Selvaratnam *et al.*, 2015)(Zhou, Weizheng *et al.*, 2016).

Entretanto, apesar dos avanços, ainda existem desafios a serem superados, como a escalabilidade dos processos, os custos de operação e a eficiência na conversão da biomassa em energia(Almomani *et al.*, 2023). Por isso, é essencial que estudos contínuos explorem formas de otimizar o cultivo, aprimorar os processos tecnológicos e avaliar a viabilidade econômica das aplicações em larga escala

Considerando a atual relevância das microalgas na produção de bioenergia e sua utilização no tratamento de águas residuais(Qiu *et al.*, 2019), este estudo apresenta uma revisão bibliométrica e sistemática detalhada dos principais indicadores de pesquisa na área. A análise foca tanto no desenvolvimento quanto na aplicação de tecnologias

baseadas em microalgas, explorando suas contribuições para a sustentabilidade ambiental e energética, com destaque para o cultivo em águas residuais. Este estudo visa identificar novas tecnologias e métodos que possam atuar na otimização do cultivo das microalgas em águas residuais, bem como, identificar soluções para maximizar os processos de geração de bioenergia. Por meio de ferramentas bibliométricas, este trabalho busca mapear a produção científica e tecnológica, identificar tendências emergentes (Borges *et al.*, 2024), lacunas no conhecimento e redes colaborativas (da Silva Aires *et al.*, 2024) (Menezes Ferreira *et al.*, 2025), avaliando o impacto de publicações e o potencial de inovação em aplicações práticas. Dessa forma, a análise bibliométrica será realizada examinando as palavras-chave em conjunto com os portais de revisão bibliográfica, a fim de responder às seguintes questões de pesquisa (QPs):

- QP1. Como a produção científica sobre o uso de microalgas na bioenergia e no tratamento de águas residuais se desenvolveu ao longo do tempo?
- QP2. Quais são os principais temas e tendências de pesquisa (palavras-chave) dentro da literatura sobre a aplicação de microalgas na bioenergia e no tratamento de águas residuais?
- QP3. Quais são as principais microalgas utilizadas e suas principais tecnologias de cultivo na produção de bioenergia?
- QP4. Quais são os principais grupos de pesquisa e instituições que lideram os estudos sobre microalgas aplicadas à produção de bioenergia e ao tratamento de efluentes?
- QP5. Como as patentes recentes demonstram avanços e oportunidades para a aplicação industrial das microalgas na produção de bioenergia e no tratamento de águas residuais?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Identificar novas tecnologias e métodos que possam atuar na otimização do cultivo das microalgas em águas residuais, bem como, identificar soluções para maximizar os processos de geração de bioenergia.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a evolução da pesquisa sobre microalgas na bioenergia e no tratamento de águas residuais.
- Identificar temas e tendências na literatura sobre microalgas aplicadas à bioenergia e ao tratamento de efluentes.
- Mapear as principais microalgas, tecnologias de cultivo e tipos de bioenergia produzidos a partir delas.
- Identificar os grupos de pesquisa e instituições líderes na área.
- Examinar patentes recentes para avaliar inovações e oportunidades industriais.

3 METODOLOGIA

3.1 Banco de dados

As bases de dados utilizadas foram a Web of Science e a Scopus. A Web of Science (WoS), desenvolvida pela Clarivate Analytics, é uma das bases de dados mais antigas e respeitadas, contendo uma ampla cobertura de artigos científicos e revisões. Sua estrutura permite análises bibliométricas detalhadas, incluindo métricas de citação, redes de colaboração e tendências de pesquisa (Koo; Lin, 2024). Além disso, a WoS é frequentemente utilizada para avaliar o impacto científico de publicações e pesquisadores, sendo uma ferramenta essencial para estudos bibliométricos. Já a Scopus, mantida pela Elsevier, destaca-se por sua cobertura abrangente e atualizada de periódicos científicos, oferecendo ferramentas avançadas para análise de citações, identificação de tendências de pesquisa e mapeamento de colaborações internacionais (Chamorro *et al.*, 2025). A Scopus é particularmente valorizada por incluir uma ampla gama de publicações de diferentes regiões do mundo, o que a torna uma fonte robusta para estudos bibliométricos.

A combinação dessas duas bases de dados permite uma visão mais completa e equilibrada do panorama científico, garantindo que os dados coletados sejam representativos e abrangentes.

3.2 Coleta de dados

O procedimento iniciou-se através de uma busca realizada na base de dados da Web of Science (WoS) e na Scopus, utilizando os descritores "**microalgae**" AND "**bioenergy**" AND "**wastewater**", garantindo a abordagem integrada dos temas centrais da pesquisa. Para refinar os resultados, foram aplicados critérios de inclusão específicos. Apenas documentos publicados no idioma inglês foram considerados, abrangendo o

período de 2014 a 2024, de modo a contemplar os avanços mais recentes no campo de estudo. Além disso, foram selecionados apenas artigos científicos e artigos de revisão, excluindo outros tipos de documentos. Por fim, a pesquisa foi delimitada às seguintes categorias temáticas: *Environmental Sciences*, *Energy Fuels*, *Biotechnology Applied Microbiology*, *Engineering Environmental* e *Engineering Chemical*. A busca retornou um total de 247 publicações na Web of Science e 377 na Scopus.

3.3 Extração de dados

Esses dados foram exportados no formato *bib.text*. As publicações foram posteriormente integradas em uma única base de dados para análise bibliométrica. Como ambas as bases podem conter registros duplicados, foi necessário realizar um procedimento de remoção de textos duplicados através do software Bibliometrix no ambiente RStudio. A identificação e exclusão de duplicatas foram realizadas com base no DOI (Digital Object Identifier), título e autores, resultando em uma base consolidada com 426 publicações únicas, resultando na remoção de 198 obras duplicadas. Através do Software RStudio, converteu-se o banco no formato *.csv*, visando o processamento dos dados posteriormente, utilizando o software Microsoft Excel.

A seleção da literatura e a análise e extração dos dados dos artigos escolhidos foram realizadas. A base de dados disponibiliza informações sobre o número anual de publicações, a frequência de citações, os países (Araújo, E. V. *et al.*, 2024) de origem, os autores (Melo *et al.*, 2024), as revistas (Catumba *et al.*, 2023), as instituições (Melo *et al.*, 2025), o número de citações, análise das principais palavras chaves (Dari *et al.*, 2024) e as agências de financiamento. Além disso, o índice H pode ser utilizado para medir a produtividade e o impacto de pesquisadores, instituições, revistas científicas e até mesmo países.

3.4 Visualização e análise de dados

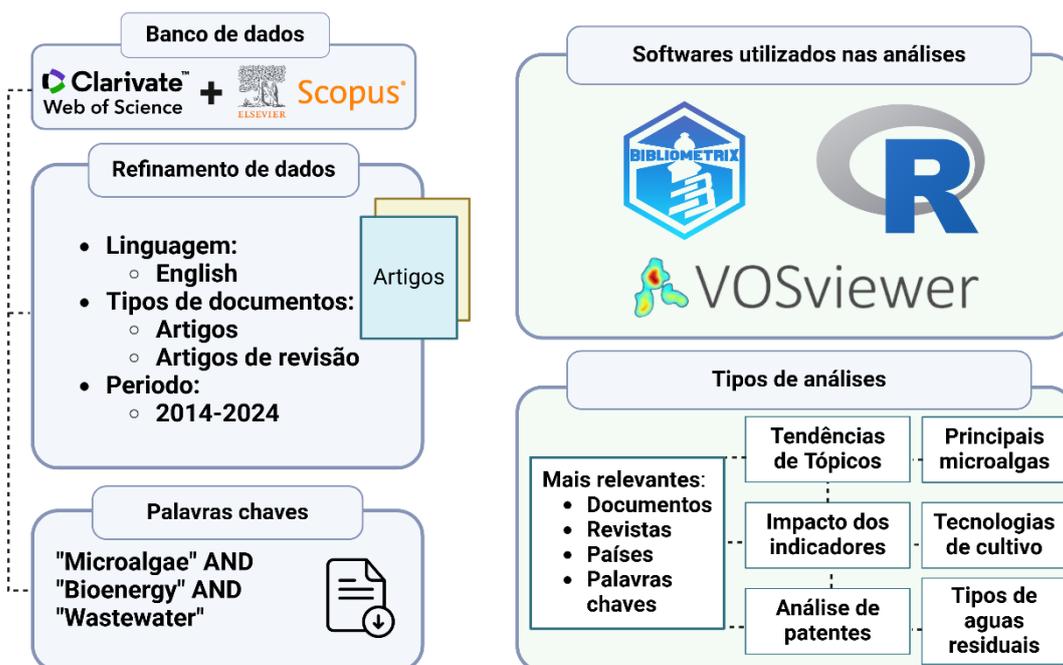
Para a análise bibliométrica deste estudo, foram utilizadas ferramentas especializadas que permitem a visualização e interpretação de dados científicos de forma estruturada. O VOSviewer foi a principal ferramenta para a visualização de redes de relacionamentos entre autores, instituições, países e palavras-chave. Essa plataforma é reconhecida por sua capacidade de transformar grandes volumes de dados em mapas visuais interativos, que facilitam a identificação de padrões e conexões, através de análises como coautoria, cocitação e coocorrência (Fenfen *et al.*, 2023). O VOSviewer

permitiu mapear colaborações científicas, influências temáticas e a evolução de tópicos ao longo do tempo.

Outra ferramenta utilizada além do Vosview, é o Bibliometrix, na qual se trata de um pacote do R voltado para análise bibliométrica, sendo empregado para processar e analisar os dados extraídos das bases de dados. Essa ferramenta foi essencial para calcular métricas como produtividade anual, distribuição geográfica das publicações e impacto de autores e revistas (Alazaiza *et al.*, 2024). O Bibliometrix também possibilitou a identificação de tendências de pesquisas futuras e a avaliação do impacto científico por meio de indicadores como o índice H e a média de citações por documento (Chen, Xiuming; Tian; Fang, 2025).

Por fim, o Microsoft Excel foi empregado para organizar e processar os dados extraídos, permitindo gerar tabelas e gráficos que complementam os mapas e gráficos disponibilizados pelo VOSviewer e do Bibliometrix. Na análise de patentes, o Microsoft Excel foi a principal ferramenta utilizada, sendo aplicado para gerar gráficos e tabelas, que possibilitaram uma análise das principais tecnologias, universidades, países e inventores. A figura 1 apresenta os processos metodológicos adotados para realização da revisão.

Figura 1. Processo metodológico utilizado na revisão bibliométrica



Fonte: Autor (2025)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

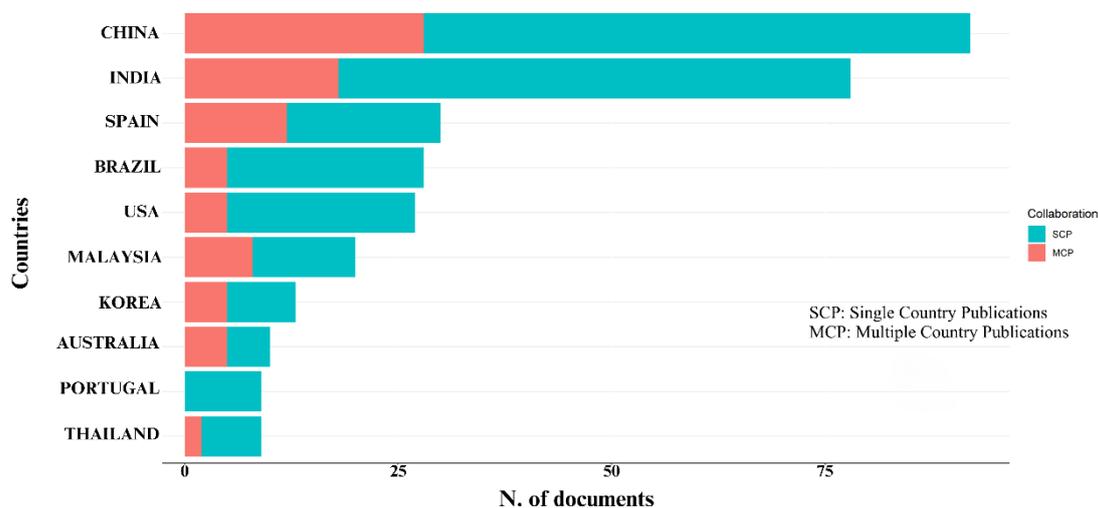
Nesta seção, são apresentados os resultados mais relevantes da análise bibliométrica, estruturados em cinco eixos principais: avaliação da produtividade científica (considerando autores, periódicos e países), análise detalhada dos documentos selecionados, identificação de tendências temáticas por meio de termos-chave e palavras indexadas, além de uma revisão crítica que explora o papel das microalgas tanto na geração de bioenergia quanto no tratamento sustentável de águas residuais.

5.1 Revisão Bibliométrica

5.1.1 Países

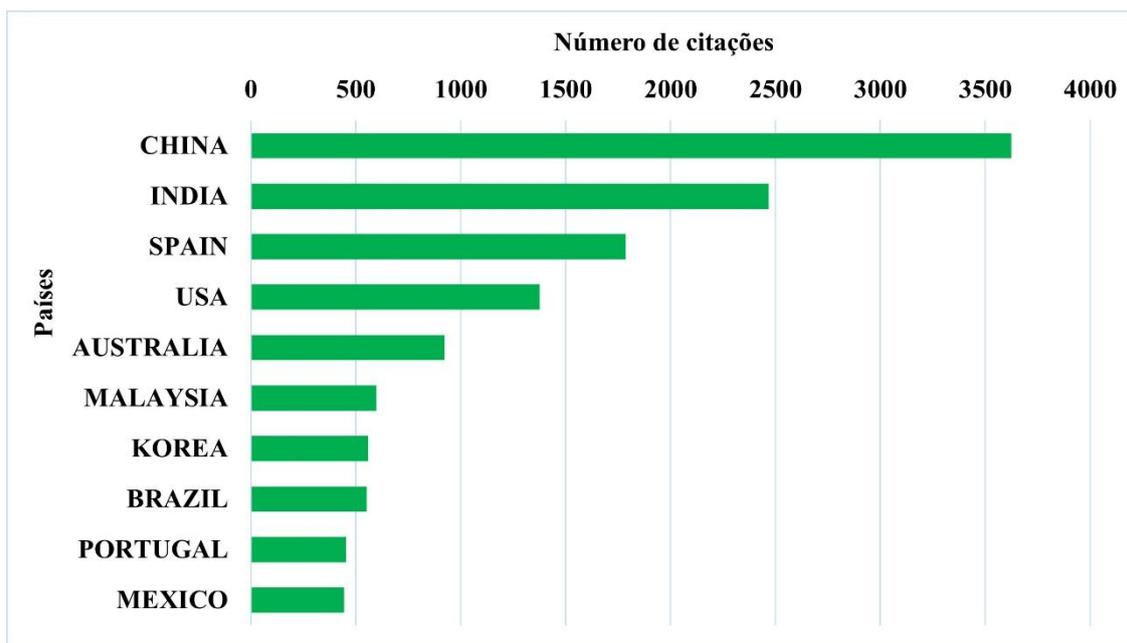
Realizou-se uma análise da produção científica por país visando observar o comportamento de publicações e citações, bem como entender o comportamento cooperativo entre os países. A figura 2 apresenta o quantitativo de publicações para os principais países e a figura 3 descreve o número de citações obtidas nestes artigos. Observa-se inicialmente um domínio da China, com um total de 92 publicações e um quantitativo de 3625 citações. A integração entre universidades, empresas e setores governamentais tem acelerado o desenvolvimento de soluções baseadas em microalgas, resultando em uma produção científica expressiva e avanços tecnológicos na área.

Figura 2. Número de publicações dos países mais relevantes



Fonte: Autor (2025)

Figura 3. Número de citações dos países mais relevantes

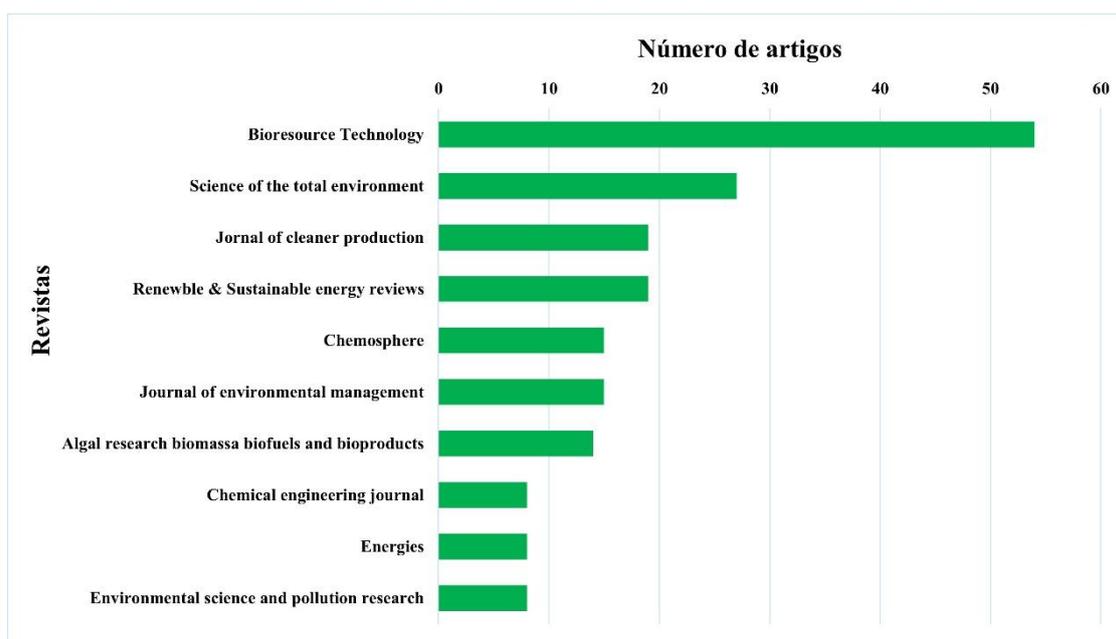


Fonte: Autor (2025)

Seguindo a China, vem países como Índia, com um total de 78 publicações e um total de citações de 2469. Posteriormente aparece a Espanha, Brasil e Estados Unidos, com um total de publicações respectivamente de 30, 28 e 27 publicações. As figuras 4 apresenta uma representação gráfica, exibindo o quantitativo de publicações, considerando publicações realizadas individualmente pelo país, conforme conteúdo de cor vermelha disposta no gráfico, e no conteúdo de cor azul, é possível identificar o total de publicações que tiveram cooperações com outros países. A figura 5, por outro lado, apresenta os principais países com maior número de citações, evidenciando destaques, conforme supracitado, para China, Índia, Espanha e Estados Unidos, com valores respectivos de: 3625, 2469, 1786 e 1377 citações.

A figura 4 apresenta um mapa de rede de colaboração entre países com pelo menos 5 citações, cuja função principal é representar como ocorre a cooperação entre estes países. Pode-se observar a criação de quatro principais redes, expostas pela cor azul, amarelo, verde e vermelho. No cluster da cor azul, observa-se o principal país (China) com o maior número de publicações, juntamente com os Estados Unidos. No cluster vermelho, percebe-se uma ligação entre países como Índia e Coreia do Sul. Já no cluster verde, verifica-se uma maior interação entre Malásia e Indonésia. Por fim, no cluster amarelo, identifica-se a presença de países entre os de maior relevância, como por exemplo, Espanha e Brasil.

Figura 5. Número de publicações para as 10 principais revistas



Fonte: Autor (2025)

Outras revistas importantes incluem Renewable & Sustainable Energy Reviews (19 artigos), Chemosphere (15 artigos) e Journal of Environmental Management (15 artigos). Estas publicações indicam um enfoque diversificado em tecnologias renováveis, manejo de recursos ambientais e questões de sustentabilidade.

Conforme exposto na tabela 1, ao considerar o impacto acadêmico, observa-se o destaque para a Bioresource Technology, acumulando 2.841 citações e apresentando um índice H de 33, confirmando seu papel essencial no avanço do conhecimento científico na área. A Renewable & Sustainable Energy Reviews, com 1.449 citações e índice H de 16, e a Science of the Total Environment, com 1.373 citações e índice H de 20, também são notáveis pela relevância dos trabalhos publicados. As obras demonstraram que as revistas de maior impacto apresentam um equilíbrio entre a quantidade de artigos e a sua influência científica, refletida por dois principais fatores, que é o número de citações e o índice H.

Embora revistas como Chemosphere e Journal of Environmental Management apresentem menor quantidade de citações (528 e 380, respectivamente), elas contribuem significativamente ao contexto da pesquisa com índices H de 13 e 9, evidenciando a qualidade e relevância de seus artigos. Já periódicos como o Algal Research Biomass Biofuels and Bioproducts e Environmental Science and Pollution Research, embora com menos citações e publicações, direcionam suas pesquisas para áreas com maior

emergência, como por exemplo, o uso de algas para bioenergia e sua utilização no tratamento de águas residuais, que na ocasião é o foco principal da análise deste estudo.

Tabela 1. Número de citações para as 10 principais revistas

REVISTAS	Nº DE CITAÇÕES	H_indez
Bioresource Technology	2841	33
Science of the total environment	1373	20
Jornal of cleaner production	1025	16
Renewable & Sustainable energy reviews	1449	16
Chemosphere	528	13
Journal of environmental management	380	9
Algal research biomass biofuels and bioproducts	897	12
Chemical engineering journal	270	5
Energies	327	7
Environmental science and pollution research	140	6

Fonte: Autor (2025)

5.1.3 Documentos

A análise bibliométrica identificou os artigos mais citados relacionados ao tema, demonstrando como as publicações científicas têm contribuído para o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de tecnologias baseadas no uso de microalgas. A Tabela 2 apresenta os 10 artigos mais citados, ordenados pela quantidade total de citações, com suas respectivas revistas associadas e o ano em que as obras foram publicadas.

Observa-se inicialmente que o artigo com maior número de citações foi publicado na Bioresource Technology em 2014, intitulado “*Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from wastewater treatment system into bio-crude oil*”, possui um total de 320 citações. Este estudo aborda uma aplicação de liquefação hidrotérmica para conversão de biomassa microalgal em bio-óleo, focando tanto para a viabilidade técnica quanto aos benefícios ambientais ao integrar sistemas de tratamento de águas residuais à produção de biocombustíveis. Essa abordagem possui dupla aplicação, o que possivelmente justifica a posição do artigo como uma referência para pesquisas futuras.

Na segunda posição, observa-se o artigo publicado na Energy no mesmo ano, “*Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives – A mini review*”, acumulando 316 citações. Este trabalho resume as vantagens do uso de microalgas como

biocombustíveis de terceira geração assim como suas aplicações no controle de emissões de gases poluentes e prejudiciais ao meio ambiente, bem como medidas de remediação ambiental, trazendo perspectivas práticas para aplicabilidade de novas tecnologias.

Tabela 2. Top 10 das publicações mais citadas

N	REVISTAS	ANO	TÍTULO	N. DE CITAÇÕES	Ref.
1	BIORESOURCE TECHNOLOGY	2014	Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from wastewater treatment system into bio-crude oil	320	(Chen, Wan Ting <i>et al.</i> , 2014)
2	ENERGY	2014	Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives – A mini review	316	(Maity <i>et al.</i> , 2014)
3	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	2018	A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments	272	(Raheem <i>et al.</i> , 2018)
4	RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	2020	Microalgal-bacterial consortia: From interspecies interactions to biotechnological applications	239	(Zhang <i>et al.</i> , 2020)

N	REVISTAS	ANO	TÍTULO	N. DE CITAÇÕES	Ref.
5	BIOCATALYSIS AND AGRICULTURAL BIOTECHNOLOGY	2019	Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation	202	(Mathimani; Pugazhendhi, 2019)
6	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	2015	Photosynthetic bioenergy utilizing CO ₂ : an approach on flue gases utilization for third generation biofuels	200	(Cuellar- Bermudez <i>et al.</i> , 2015)
7	WATER RESEARCH	2020	Revealing the role of adsorption in ciprofloxacin and sulfadiazine elimination routes in microalgae	200	(Xie <i>et al.</i> , 2020)
8	FRONTIERS IN SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS	2018	Recovery of Nutrients From Wastewaters Using Microalgae	198	(Acién Fernández; Gómez-Serrano; Fernández- Sevilla, 2018)
9	JOURNAL OF WATER PROCESS ENGINEERING	2021	Microalgae-based biorefineries for sustainable resource recovery from wastewater	196	(Goswami <i>et al.</i> , 2021)
10	WATER RESEARCH	2015	Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production	188	(Passos; Ferrer, 2015)

Fonte: Autor (2025)

Outros destaques incluem um artigo publicado na *Journal of Cleaner Production* em 2018 com 272 citações, que destaca os avanços recentes na produção sustentável de biocombustíveis, e o estudo publicado na *Renewable and Sustainable Energy Reviews* em 2020, com 239 citações, que apresenta a aplicação de consórcios microalgais-bacterianos como ferramentas biotecnológicas promissoras.

Os temas abordados pelos artigos mais citados se categorizam em três áreas principais: A produção Sustentável de Energia, onde os artigos como os publicados na *Bioresource Technology*, *Energy* e *Journal of Cleaner Production* indicam que o foco inicial das pesquisas era a conversão eficiente da biomassa de microalgas em biocombustíveis e bioenergia. A integração com Sistemas Ambientais, que pode ser visto em trabalhos recentes, como os publicados na *Water Research* e na *Journal of Water Process Engineering*, que demonstram a crescente integração entre o cultivo de microalgas e o manejo de águas residuais, visando à recuperação de recursos e à redução do impacto ambiental. E por fim, os avanços tecnológicos, na qual se percebe através dos estudos mais recentes, como por exemplo, o de consórcios microalgais-bacterianos, que sinalizam novas possibilidades através do avanço tecnológico, apresentando um processo com potencial de ser implementado a nível industrial.

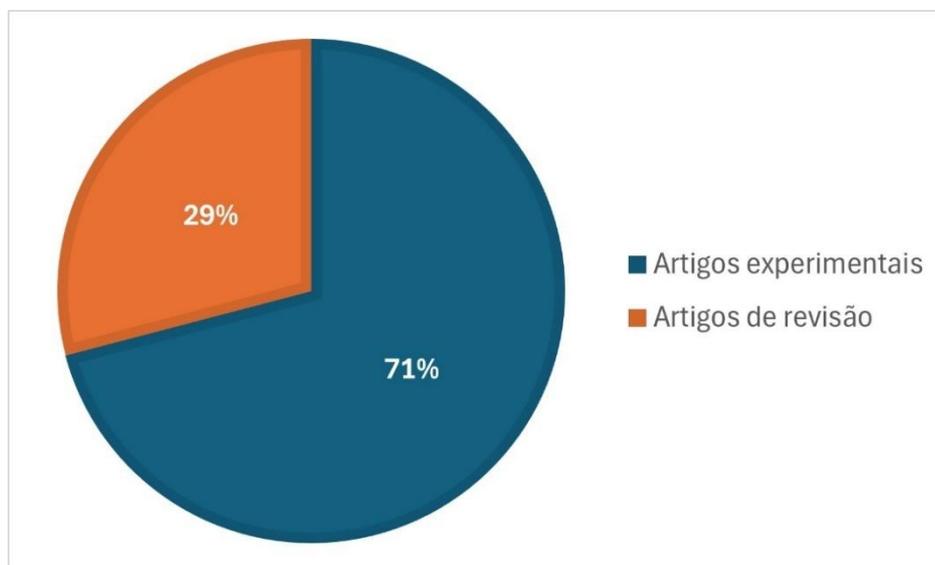
Outro fator importante a ser destacado, se dá através da análise temporal das publicações, onde se observa que os artigos mais citados surgiram a partir de 2014, com uma concentração dos principais estudos inovadores entre 2018 e 2021. Este intervalo reflete a crescente relevância do tema na última década, em alinhamento com demandas globais por tecnologias limpas e sustentáveis.

Os resultados desta análise confirmam que as microalgas são um tema central no desenvolvimento de biotecnologias sustentáveis. Considerando os artigos mais citados, é possível visualizar não apenas os avanços técnicos, mas também fornecendo informações para futuras pesquisas que possam ser replicadas em alta escalabilidade, com foco em eficiência energética e na redução do impacto ambiental. O aumento de publicações recentes sugere que a área continua a crescer, impulsionada diretamente pela necessidade de obtenção de novas alternativas energéticas viáveis, assim como soluções capazes de reduzir os impactos ambientais.

No total de documentos analisados, observa-se que a maioria corresponde a artigos experimentais, representando 71% do total, enquanto os artigos de revisão constituem os 29% restantes, conforme ilustrado na Figura 6. Essa predominância de estudos experimentais reflete o foco significativo dos pesquisadores em investigar e

desenvolver novas aplicações e tecnologias relacionadas às microalgas, com base em dados obtidos em análises em laboratório. Por outro lado, a proporção relevante de artigos de revisão demonstra o esforço contínuo para concretizar o conhecimento existente, fornecendo bases teóricas sólidas para o avanço e a aplicação das pesquisas no setor.

Figura 6. Percentual dos tipos de documentos selecionados na revisão bibliométrica



Fonte: Autor (2025)

5.1.4 Palavras-chave

A análise das palavras-chave utilizadas nos artigos selecionados oferece uma visão abrangente sobre os principais temas e tendências de pesquisa no campo das microalgas. A tabela 3 apresenta as 10 principais palavras chaves com as respectivas frequências com elas ocorrem. Observando a tabela, visualiza-se o termo mais frequente, "biomass", com 248 ocorrências, demonstrando a importância central da biomassa de microalgas como base para variadas aplicações, que são utilizadas desde a produção de biocombustíveis até o desenvolvimento de bioprodutos. Em seguida, os termos "microalgae" e sua variação singular "microalga", com 170 e 168 ocorrências, respectivamente, reforçam o foco central nas microalgas como organismo-chave em estudos biotecnológicos e ambientais.

Outro termo importante é a "bioenergy", que aparece 130 vezes, indicando o crescente na utilização de microalgas para geração de energia limpa e renovável, alinhando-se principalmente às metas globais de descarbonização. A presença constante do termo "algae" (121 ocorrências) mostra que, embora o foco principal seja em microalgas, a pesquisa considera amplamente o papel de algas na biotecnologia,

especialmente em sistemas de tratamento de águas residuais, assim como em uma produção sustentável.

Tabela 3. Top 10 das palavras chaves com maior frequência

TERMOS	FREQUÊNCIA
Biomass	248
Microalgae	170
Microalga	168
Bioenergy	130
Algae	121
Wastewater Treatment	105
Waste Water	89
Cultivation	86
Wastewater	78
Biofuels	76

Fonte: Autor (2025)

Os termos relacionados ao tratamento de efluentes, como "wastewater treatment" (105 ocorrências), "waste water" (89 ocorrências) e "wastewater" (78 ocorrências), destacam a relevância das microalgas em processos de remediação de efluentes. Esses resultados demonstram o potencial das microalgas em sistemas de tratamento de águas residuais, seja pela remoção de poluentes, pela recuperação de nutrientes ou até mesmo pela integração com sistemas de bioenergia.

Outro aspecto não menos importante a ser destacado, é a presença do termo "cultivation", com 86 ocorrências, que atribui às diversas abordagens utilizadas visando otimizar o crescimento das microalgas. A busca por novas técnicas eficientes de cultivo, tem sido o foco de muitos pesquisadores, que incluem por exemplos, o desenvolvimento de novos sistemas fotobiorreatores alinhados ao uso de águas residuais como meio de crescimento, o que consequentemente seria uma justificativa crucial para viabilizar a aplicação das microalgas no meio industrial. Por fim, o termo "biofuels", com 76 ocorrências, reforça a relevância das microalgas como matéria-prima para a produção de biocombustíveis de terceira geração, como por exemplo, o biodiesel, bioetanol e biogás.

Na Figura 7, observa-se um mapa de rede, com a criação de quatro grandes redes, expostas pela cor vermelho, verde, amarelo e azul. No primeiro cluster vermelho, encontra-se palavras chaves como "Microalgae", "cultivation" e "biomass", assim como

5.1.5 Tendências temáticas

As principais palavras-chave desempenham um papel essencial na análise de tendências temáticas em qualquer campo de pesquisa, pois descrevem os tópicos mais abordados e as conexões entre diferentes áreas de estudo. Considerando um contexto bibliométrico, elas atuam como espécie de indicadores diretos dos principais focos de interesse dos pesquisadores, possibilitando desta maneira, a identificação de temas consolidados e emergentes. Além disso, sua análise detalhada, especialmente em mapas temáticos, permite compreender como os tópicos estão organizados, e principalmente sobre sua relevância no desenvolvimento científico e como a interação das mesmas pode auxiliar para impulsionar novas descobertas. Portanto, o estudo das palavras-chave é de extrema importância para traçar o panorama da atual literatura e apontar caminhos para possíveis investigações futuras.

O mapa temático disposto na figura 10 foi gerado com auxílio da ferramenta Bibliometrix, na qual este tipo de mapa é dividido em quadrantes com base na densidade e centralidade das palavras-chave, oferecendo desta maneira, uma representação visual clara dos principais temas abordados na literatura. Os clusters são destacados por cores e localizados em diferentes quadrantes, indicando seu nível de desenvolvimento e relevância no campo de estudo.

Figura 10. Mapa temático dividido em quadrantes



Fonte: Autor (2025)

No quadrante superior direito, identificado como temas motores, encontram-se dois clusters principais. O primeiro, destacado na cor laranja, é composto pelas palavras-chave “nonhuman”, “waste water management” e “bioremediation”, indicando áreas amplamente desenvolvidas e essenciais para o campo de pesquisa sobre microalgas, com grande relevância para aplicação em soluções de manejo sustentável de águas residuais. O segundo cluster, na cor azul, abrange os termos “bioenergy”, “microalga” e “wastewater treatment”, representando tópicos centrais na aplicação biotecnológica das microalgas para geração de energia renovável e tratamento de efluentes.

Entre os quadrantes superior esquerdo e inferior esquerdo, há um pequeno cluster de transição, formado pelas palavras “biodiesel”, “lipid” e “nutrient”. Esse cluster está relacionado à pesquisa sobre a produção de biodiesel a partir de microalgas, com foco nos lipídios como matéria-prima e nos nutrientes que influenciam o crescimento e a produtividade das algas.

No quadrante inferior esquerdo, classificado como temas emergentes ou marginais, está localizado um cluster maior, representado na cor verde. Este grupo inclui as palavras-chave “biodiesel production”, “biomass production” e “nutrient removal”, evidenciando o interesse exponencial na utilização de microalgas para a produção de biocombustíveis e para métodos de remoção de nutrientes em processos de biorremediação. Apesar de ser menos central no mapa, o tamanho e a densidade do cluster demonstram o crescimento desses temas.

Por fim, no quadrante inferior direito, sobre a linha de divisão com o quadrante inferior esquerdo, encontra-se um cluster destacado na cor pêssego, que inclui as palavras-chave “biomass”, “microalgae” e “algae”. Este cluster representa os conceitos fundamentais e amplamente aplicáveis, com conexões fortes entre estudos experimentais e revisões teóricas sobre o uso da biomassa das microalgas. Sua posição na interface dos quadrantes inferior esquerdo e inferior direito indica uma transição temática entre áreas emergentes e tópicos mais básicos.

Essa análise detalhada dos clusters e sua distribuição nos quadrantes oferece uma visão estratégica sobre os focos de pesquisa no campo de estudo, apontando as áreas mais consolidadas e demonstrando oportunidades para o avanço em temas emergentes. O mapa temático, portanto, é uma ferramenta valiosa que visa identificar tendências e orientar sobre as futuras investigações na área.

5.2 Visão geral sobre microalgas

Esta seção oferece uma visão geral sobre as variadas aplicações e uso de microalgas para produção de bioenergia e suas principais características, conforme identificado por meio da análise bibliométrica discutida anteriormente. Serão exploradas as principais tecnologias de cultivo utilizadas, como tanques a céu aberto e fotobiorreatores, destacando suas características e vantagens. Além disso, os subtópicos desta seção estão organizados para abordar, de forma estruturada, os diferentes tipos de cultivo e as espécies de microalgas mais utilizadas nos estudos, oferecendo um panorama claro e fundamentado sobre o tema.

5.2.1 Características e tipos de microalgas

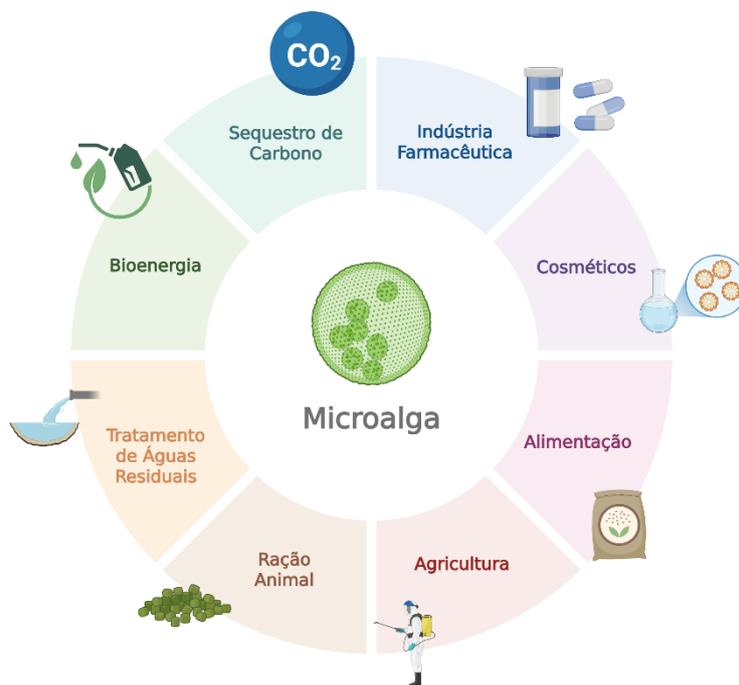
As microalgas desempenham um papel essencial na sustentabilidade ambiental, contribuindo para o equilíbrio do ecossistema ao transformar dióxido de carbono em oxigênio e gerar biomassa. Sua relevância está atrelada a uma série de fatores, dentre eles destaca-se a biotecnologia, que tem sido explorada em diferentes setores, como por exemplo, no desenvolvimento de produtos farmacêuticos, cosméticos, alimentos e rações (Fernández *et al.*, 2021). A figura 11 exemplifica as principais aplicações para as microalgas, na imagem é possível identificar o seu uso desde alimentos até a geração de bioenergia.

Essas algas são encontradas em ambientes diversos como oceanos, lagos, rios e até mesmo solos úmidos, apresentando uma estrutura celular simples, geralmente composta por uma parede celular rica em polissacarídeos e lipídios, além de clorofila e outros pigmentos fotossintéticos que variam de acordo com a espécie. Essa diversidade estrutural e bioquímica é uma das características principais que as tornam tão promissoras para diferentes aplicações biotecnológicas.

Entre as características mais notáveis das microalgas está sua alta taxa de crescimento e eficiência na utilização de recursos como luz solar, nutrientes e água, fatores que as diferenciam de outras fontes biológicas. Elas podem ser cultivadas em diferentes sistemas, desde tanques abertos até fotobiorreatores fechados, utilizando água doce, salina ou até mesmo águas residuais. As microalgas são organismos versáteis que têm sido amplamente estudados por sua capacidade de remover poluentes de águas residuais e, ao mesmo tempo, produzir biomassa para bioenergia. Essa flexibilidade, aliada à capacidade de acumular biomoléculas valiosas, como lipídios, proteínas e

carboidratos, torna as microalgas candidatas ideais para a produção sustentável de biocombustíveis, bioprodutos e biomassa de alta qualidade.

Figura 11. Principais aplicações de microalgas



Fonte: Autor (2025)

A análise dos estudos listados na tabela 4 revela que determinadas espécies de microalgas são frequentemente empregadas em pesquisas relacionadas ao tratamento de águas residuais e à produção de bioenergia.

Dentre as espécies mais utilizadas, a *Chlorella vulgaris* e a *Scenedesmus* spp. se destacam pela sua eficiência e capacidade de adaptação em cultivo nas variadas condições ambientais e tipos de efluentes.

A *Chlorella vulgaris* foi empregada em diversas aplicações, desde o tratamento de águas residuais têxteis até a produção de bioeletricidade em células de combustível microbiano (Logroño *et al.*, 2017) (Gouveia *et al.*, 2014). No estudo de Logroño *et al.* (2017), a microalga foi utilizada em uma célula de combustível microbiana com biofilme microalgal no cátodo, demonstrando alta eficiência na remoção de metais pesados e corantes, possibilitando ainda a geração de bioeletricidade. Enquanto no estudo de Gouveia *et al.* (2014), a *Chlorella vulgaris* foi cultivada em fotobiorreatores sob diferentes intensidades luminosas, mostrando que a atividade fotossintética é crucial tanto para a produção de energia quanto para a síntese de pigmentos de alto valor agregado.

O gênero *Scenedesmus*, especialmente a *Scenedesmus obliquus* e a *Scenedesmus quadricauda*, também se mostraram altamente eficazes na remoção de

nutrientes e poluentes de águas residuais de diversos efluentes (Ferreira *et al.*, 2018) (Yang *et al.*, 2018). No décimo estudo citado na tabela 4, por exemplo, a *Scenedesmus obliquus* foi cultivada em uma mistura de efluentes, contendo águas residuais de suinocultura, avicultura, indústrias de cerveja e laticínios, alcançando altas taxas de remoção de nitrogênio superiores a 95% e produzindo biomassa rica em proteínas (31-53%) e lipídios (8-23%) (Ferreira *et al.*, 2018). Essa biomassa foi posteriormente aplicada para produção de biohidrogênio, com rendimentos de até 390 mL H₂/g VS (Ferreira *et al.*, 2018).

Além destas espécies, outras microalgas foram utilizadas, como por exemplo, a *Chlamydomonas* sp. e *Tetraselmis suecica*, porém em aplicações específicas. Um dos estudos fez uso da microalga denominada *Chlamydomonas* sp., o experimento tinha como objetivo remover ciprofloxacina e sulfadiazina de águas residuais municipais, possibilitando observar que a adsorção e a biodegradação são os principais mecanismos de remoção desses poluentes (Xie *et al.*, 2020) (Muradov *et al.*, 2015). No estudo de Muradov *et al.* (2015), a *Tetraselmis suecica* foi cocultivada com fungos para floculação e produção de biodiesel, destacando desta maneira o potencial de sistemas simbióticos na melhoria da coleta de biomassa assim como na produção de lipídios.

Portanto, observa-se que as microalgas mais utilizadas foram a *Chlorella vulgaris* e a *Scenedesmus* sp. Essas microalgas possuem grande potencial para aplicações em biocombustíveis e tratamento ambiental. No caso da *Chlorella vulgaris*, observa-se um destaque relacionado a sua versatilidade no cultivo, adaptando-se facilmente a diferentes condições, apresentando ainda alta densidade celular, o que facilita a colheita e o processamento da biomassa. No entanto, cabe destacar um ponto negativo quando comparado com a *Scenedesmus*, que é sua sensibilidade a variações ambientais, o que pode necessitar de um controle mais rigoroso do meio de cultivo. Já *Scenedesmus* é mais resistente a estas condições adversas, como variações de temperatura e salinidade, tornando-se uma ótima opção para sistemas com menos controle. Todavia, sua estrutura colonial pode dificultar o processamento da biomassa em determinadas aplicações.

A diversidade de espécies microalgais utilizadas nos estudos indica uma flexibilidade desses organismos em diferentes aplicações, que pode ser visto desde o tratamento de efluentes complexos até a geração de variadas aplicações de bioenergia. Essa versatilidade destaca as microalgas como uma ferramenta promissora para a integração de processos de tratamento de águas residuais e produção sustentável de energia.

Tabela 4. Os 10 principais artigos experimentais conforme número de citações

ID	Título	Ano	Total de Citações	Cultura	Tecnologia	Águas residuais	Bioenergia	Ref
1	Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from wastewater treatment system into bio-crude oil	2014	320	Misto (Não especificado)	Photobiorreator	Not specified	Biodiesel; Biogás; Bio-crude	(Chen, Wan Ting <i>et al.</i> , 2014)
2	Revealing the role of adsorption in ciprofloxacin and sulfadiazine elimination routes in microalgae	2020	200	Chlamydomonas sp	Photobiorreator	municipal wastewater	Biodiesel	(Xie <i>et al.</i> , 2020)
3	Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production	2015	188	Mixed (Chlamydomonas sp., Scenedesmus sp. Nannocloropsis sp.; Chlorella sp.)	Photobiorreator	Pre-treated university wastewater	Biogas	(Passos; Ferrer, 2015)
4	Fungal-assisted algal flocculation: application in wastewater treatment and biofuel production	2015	167	Chlorella protothecoides; Tetraselmis suecica;	Not specified	Pig farming wastewater	Biodiesel	(Muradov <i>et al.</i> , 2015)
5	Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic 2 microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of 3 bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater	2017	164	Chlorella vulgaris	Not specified	Textile industry dyeing wastewater	Bioelectricity	(Logroño <i>et al.</i> , 2017)
6	Effect of light on the production of bioelectricity and added-value microalgae biomass in a Photosynthetic Alga Microbial Fuel Cell	2014	159	Chlorella vulgaris	Photobiorreator	Not specified	Bioelectricity	(Gouveia <i>et al.</i> , 2014)

ID	Título	Ano	Total de Citações	Cultura	Tecnologia	Águas residuais	Bioenergia	Ref
7	Growth of microalgae on undiluted anaerobic digestate of piggery effluent with high ammonium concentrations	2017	152	Chlorella sp.	Raceway	Pig farming wastewater	Biogas	(Ayre; Moheimi; Borowitzka, 2017)
8	Algal biofilm-assisted microbial fuel cell to enhance domestic wastewater treatment: nutrient, organics removal and bioenergy production	2018	120	Scenedesmus quadricauda	Not specified	Domestic wastewater	Biodiesel	(Yang <i>et al.</i> , 2018)
9	Long-term anaerobic digestion of microalgae grown in HRAP for wastewater treatment. Effect of microwave pretreatment	2014	112	Scenedesmus sp; Chlorella sp; Spirulina; Chlorella vulgaris.	Raceway	Domestic wastewater	Biogas	(Passos <i>et al.</i> , 2014)
10	Combining biotechnology with circular bioeconomy: From poultry, swine, cattle, brewery, dairy and urban wastewaters to biohydrogen	2018	109	Scenedesmus obliquus	Photobiorreator	Wastewater (poultry, pig and cattle farming, brewery and dairy industries and urban)	Biohydrogen	(Ferreira <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: Autor (2025)

5.2.2 Tecnologias de cultivo

A escolha do método de cultivo utilizado é sem dúvida um fator determinante, visto que cada tipo de tecnologia utilizada possui suas particularidades, possuindo vantagem e desvantagens conforme suas aplicações (Guieysse; Plouviez, 2024).

Analisando os estudos selecionados, percebe-se que a maioria dos artigos fazem uso de fotobiorreatores, este fato se dá pela capacidade de controle oferecida pelo reator, pois permite ao pesquisador controlar a ação da temperatura, ventilação e iluminação. Diante destes fatos, destaca-se ainda a eficiência do fotobiorreator no combate a contaminação, visto que os maiores problemas encontrados ao realizar o cultivo em tanques se dão pela contaminação por insetos invasores (Nunes *et al.*, 2024) (de Bazan *et al.*, 2023).

Os fotobiorreatores foram a tecnologia mais utilizadas, sendo empregados em cinco dos estudos experimentais destacados na tabela 4 (Chen, Wan Ting *et al.*, 2014) (Xie *et al.*, 2020) (Passos; Ferrer, 2015) (Gouveia *et al.*, 2014) (Ferreira *et al.*, 2018). Esses sistemas permitem um controle preciso das condições de cultivo, como por exemplo, a intensidade luminosa, temperatura e até mesmo a disponibilidade de CO₂, que é de elevada importância para maximizar a produtividade de biomassa. Por exemplo, em um destes estudos, o uso de fotobiorreatores permitiu a produção simultânea de bioeletricidade e pigmentos de alto valor agregado, demonstrando a versatilidade dessa tecnologia (Gouveia *et al.*, 2014).

Outra tecnologia utilizada para o cultivo de microalgas, é a utilização de um tanque de céu aberto, denominado raceway. Construído em alvenaria, o tanque conta com um motor com uma pá de agitação que realiza a movimentação da água, garantindo a devida movimentação necessária. Este meio de cultivo possui a vantagem de necessitar menores custos, possibilitando facilmente sua aplicação. A sua pouca utilização se dá pela incapacidade de controle das amostras, pois as mesmas ficam expostas a diversos intempéries e agentes externos, o que poderia causar intercorrência nos cultivos.

O uso de tanques abertos possibilita uma redução nos custos do cultivo, no entanto cabe ressaltar que ao optar por este tipo de tecnologia, os resultados de biomassa obtidos caem consideravelmente, causando uma perda elevada quando comparada com o fotobiorreator. Neste sentido, a busca continua por uma tecnologia que possa reduzir custos no cultivo das microalgas, porém garantindo a máxima obtenção da biomassa microalgal (Pawar, 2016).

Os tanques raceway foram empregados em estudos que necessitavam ser aplicados em maior escala e menor custo operacional. Um destes estudos, utilizou-se a microalga *Chlorella sp.* Onde foi cultivada em efluentes de suinocultura. Essa tecnologia de cultivo mostrou-se eficaz para o tratamento de grandes volumes de águas residuais, embora com menor controle sobre as condições ambientais em comparação com os fotobiorreatores (Ayre; Moheimani; Borowitzka, 2017). Já em outro artigo, os tanques raceway foram utilizados para o cultivo de microalgas em águas residuais domésticas, com posterior digestão anaeróbica da biomassa para produção de biogás (Passos *et al.*, 2014).

No geral, os textos demonstram que a escolha da tecnologia de cultivo depende das condições específicas de operação, da finalidade do cultivo e principalmente dos recursos disponíveis. Enquanto os sistemas raceway oferecem vantagens econômicas em larga escala, os fotobiorreatores proporcionam maior controle e eficiência em aplicações específicas, destacando-se principalmente em um contexto que exija alta qualidade e pureza da biomassa produzida. A integração dessas tecnologias, talvez seja uma abordagem promissora que possa maximizar os benefícios do cultivo de microalgas possibilitando sua aplicação em larga escala, podendo ser replicada na indústria.

Em resumo, a escolha da tecnologia de cultivo é definida por fatores como o tipo de efluente, a escala de operação e os recursos financeiros disponíveis. Enquanto os fotobiorreatores são ideais para estudos laboratoriais e aplicações que demandam alto controle, os tanques raceway são mais aplicados em operações em larga escala, onde o custo e a simplicidade são necessários.

5.2.3 Uso de microalgas no tratamento de águas residuais e geração de bioenergia

As microalgas, organismos fotossintéticos de rápido crescimento, possuem dentre os seus diferenciais, a capacidade de absorver nutrientes (Umetani; Sposob; Tiron, 2023). Esse processo, conhecido como fitorremediação, oferece uma opção mais ecológica e viável quando comparados aos métodos convencionais de tratamento de águas residuais, que na maioria das vezes demandam alto consumo de energia e produtos químicos (Mustafa; Hayder; Mustapa, 2022).

As microalgas podem atuar no tratamento de águas residuais através de variados mecanismos, sendo o principal método, a absorção de nutrientes, como nitrogênio (Uemura *et al.*, 2023) (na forma de nitrato, amônio e nitrito) e fósforo (na forma de fosfato), que são essenciais para o crescimento das microalgas (Gutierrez *et al.*, 2016).

Neste sentido, ao assimilarem esses nutrientes, elas ajudam a reduzir a eutrofização em corpos hídricos receptores. Além disso, durante o processo de fotossíntese, as microalgas fixam dióxido de carbono, contribuindo diretamente para a redução de gases de efeito estufa(Uggetti *et al.*, 2018).

O tratamento de águas residuais por meio de microalgas tem surgido como uma abordagem sustentável e eficiente, combinando a remoção de poluentes com a produção de biomassa para produção de bioenergia(Gupta; Pawar, 2018). Entre as vantagens do uso, destaca-se a sustentabilidade do processo, pois ocorre de maneira natural e consome menos energia comparado a métodos convencionais, como o sistema de lodos ativados. Além disso, a biomassa gerada durante o tratamento pode ser aproveitada para a produção de bioenergia, como biodiesel(Chu *et al.*, 2014), biogás(Solé-Bundó *et al.*, 2018) e biohidrogênio(Morya *et al.*, 2022)(Shetty *et al.*, 2019). O uso de microalgas também pode reduzir custos operacionais, especialmente em relação à remoção de nutrientes, podendo ser aplicado em diferentes tipos de efluentes, incluindo domésticos(Seo *et al.*, 2024), agrícolas(Asih *et al.*, 2024) e industriais(Gupta; Pawar; Pandey, 2019).

Os estudos revisados compreenderam uma ampla variedade de águas residuais, observa-se uso desde efluentes domésticos até resíduos industriais e agropecuários. As águas residuais que mais foram utilizadas nos estudos foram as urbanas, em um dos estudos, as microalgas foram cultivadas em lagoas de alta taxa para remoção de nutrientes e produção de biogás(Passos *et al.*, 2014). Em outro artigo, foi utilizada a microalga *Scenedesmus quadricauda*, aplicada em um sistema integrado de célula de combustível microbiana e biofilme de algas para tratamento de águas residuais domésticas, com altas taxas de remoção de nitrogênio e fósforo (Yang *et al.*, 2018).

Um dos destaques observados, foi a aplicação e uso de efluentes de suinocultura e avicultura, onde a microalga *Chlorella sp.* foi cultivada em digestão anaeróbica de efluentes de suinocultura(Ayre; Moheimani; Borowitzka, 2017). Outro estudo aplicou o cultivo de *Scenedesmus obliquus* objetivando realizar o tratamento de águas residuais de suinocultura e avicultura, evidenciando grande eficiência na remoção destes nutrientes. Esses efluentes, ricos em amônia e matéria orgânica, representam um desafio para o tratamento convencional, visto que algumas espécies possuem dificuldade de crescimento em ambientes com altas concentrações de amônia no entanto, o estudo evidenciou o uso adequado da microalga, observando-se que além de remover os poluentes, foi possível gerar biomassa para produção de bioenergia(Ferreira *et al.*, 2018).

Águas residuais industriais, como as da indústria têxtil e de cervejarias, também foram tratadas com sucesso. Em um dos estudos, a microalga *Chlorella vulgaris* foi utilizada em uma célula de combustível microbiana para tratamento de efluentes têxteis, com remoção eficiente de corante e metais pesados. Em outro artigo, a microalga *Scenedesmus obliquus*, demonstrou alta eficiência na remoção de nutrientes de águas residuais de cervejarias, destacando o potencial das microalgas para o tratamento de efluentes industriais complexos (Logroño *et al.*, 2017)(Ferreira *et al.*, 2018).

A capacidade das microalgas de se adaptar a diferentes tipos de efluentes e de remover variados tipos de poluentes, torna as microalgas uma solução eficiente para o tratamento de águas residuais. Além disso, a biomassa gerada pode ser utilizada para produção de bioenergia, torando o ciclo econômico e totalmente sustentável.

No entanto, o tratamento de águas residuais com microalgas enfrenta desafios que precisam ser superados para sua utilização. A otimização das condições de cultivo, como luz, temperatura e pH, são essenciais para maximizar a eficiência do processo. A separação da biomassa algal da água tratada também representa um desafio técnico, especialmente em grandes escalas. Além disso, a presença de contaminantes persistentes em alguns efluentes pode reduzir a eficácia do tratamento(Ruales *et al.*, 2024). Para superar essas limitações, pesquisas recentes têm explorado o desenvolvimento de sistemas híbridos, como a integração de microalgas com bactérias em sistemas de simbiose algas-bactérias, e o uso de biorreatores avançados que permitem maior controle e eficiência(Saba *et al.*, 2017). Os estudos apresentados na tabela 4 demonstram uma diversidade de aplicações para as microalgas, utilizando-as em processos que combinam o tratamento de águas residuais com a produção de bioenergia, posicionando-as como uma solução sustentável e inovadora em resposta aos desafios ambientais globais.

A tabela 5 apresenta exemplos de estudos que trataram dos principais produtos bioenergéticos presentes entre os principais artigos experimentais, destacando-se aplicações para a geração de biodiesel (Kim *et al.*, 2014)(Ashokkumar *et al.*, 2019), biohidrogênio (Ferreira *et al.*, 2018) (Feng *et al.*, 2022) e biogás (Muradov *et al.*, 2015) (Choudhary; Prajapati; Malik, 2016).

Portanto, os trabalhos não apenas demonstram o vasto potencial das microalgas, mas também abrem caminho para uma maior integração entre tratamento ambiental e produção de energia renovável. A perfeita integração entre tecnologias de tratamento e biorrefinaria posiciona as microalgas como fortes ferramentas na transição para um futuro mais sustentável.

A Bioeconomia Circular pode ser definida como um modelo sustentável que busca otimizar o uso de recursos renováveis, promovendo a reutilização e a valorização de subprodutos. No que se refere as microalgas, esse conceito se dá pela possibilidade de aproveitamento integral da biomassa, onde os resíduos gerados durante a produção de bioenergia podem ser convertidos em produtos de alto valor agregado, como bioplásticos, ração animal, compostos farmacêuticos e fertilizantes. Essa aplicação reduz a dependência de outros recursos fósseis, contribuindo para a criação de cadeias sustentáveis.

Além da diversificação de produtos, a aplicação da Bioeconomia Circular no uso de microalgas possibilita o desenvolvimento de processos industriais de maneira integrada e de menor impacto ambiental. A realização do reaproveitamento da biomassa algal dentro de um sistema produtivo, fortalece e viabiliza economicamente sua utilização para produção de bioenergia, ao mesmo tempo que promove um ciclo produtivo reaproveitável, onde os resíduos são reutilizados no sistema produtivo. Logo, as microalgas tornam-se um elemento de grande valor na transição para uma economia sustentável.

Tabela 5. Exemplos de estudos para cada tipo de produto bioenergético obtido

BIOENERGIA	TÍTULO	AUTOR	ANO	REF
	NUTRIENT REMOVAL AND BIOFUEL PRODUCTION IN HIGH RATE ALGAL POND USING REAL MUNICIPAL WASTEWATER	KIM B;KANG Z;RAMANAN R;CHOI J;CHO D;OH H;KIM H	2014	(Kim <i>et al.</i> , 2014)
BIODIESEL	BIOENERGY PRODUCTION AND METALLIC IRON (FE) CONVERSION FROM BOTRYOCOCCUS SP. CULTIVATED IN DOMESTIC WASTEWATER: ALGAL BIOREFINERY CONCEPT	ASHOKKUMAR V;CHEN W;AL-MUHTASEB A;KUMAR G;SATHISHKUMAR P;PANDIAN S;ANI F;NGAMCHARUSSRIVICHAI C	2019	(Ashokkumar <i>et al.</i> , 2019)
	BIOCONVERSION OF MATURE LANDFILL LEACHATE INTO BIOHYDROGEN AND VOLATILE FATTY ACIDS VIA MICROALGAL PHOTOSYNTHESIS TOGETHER WITH DARK FERMENTATION.	FENG H;SUN C;ZHANG C;CHANG H;ZHONG N;WU W;WU H;TAN X;ZHANG M;HO S	2022	(Feng <i>et al.</i> , 2022)
BIOHIDROGÊNIO	COMBINING BIOTECHNOLOGY WITH CIRCULAR BIOECONOMY: FROM POULTRY, SWINE, CATTLE, BREWERY, DAIRY AND URBAN WASTEWATERS TO BIOHYDROGEN	FERREIRA A;MARQUES P;RIBEIRO B;ASSEMANY P;DE M H;BARATA A;OLIVEIRA A;REIS A;PINHEIRO H;GOUVEIA L	2018	(Ferreira <i>et al.</i> , 2018)

BIOENERGIA	TÍTULO	AUTOR	ANO	REF
BIOGÁS	FUNGAL-ASSISTED ALGAL FLOCCULATION: APPLICATION IN WASTEWATER TREATMENT AND BIOFUEL PRODUCTION	MURADOV N;TAHA M;MIRANDA A;WREDE D;KADALI K;GUJAR A;STEVENSON T;BALL ;ANDREW S A;MOURADOV A	2015	(Muradov <i>et al.</i> , 2015)
	SCREENING NATIVE MICROALGAL CONSORTIA FOR BIOMASS PRODUCTION AND NUTRIENT REMOVAL FROM RURAL WASTEWATERS FOR BIOENERGY APPLICATIONS	CHOUDHARY P;PRAJAPATI S;MALIK A	2016	(Choudhary; Prajapati; Malik, 2016)

Fonte: Autor (2025)

6. PONTOS FORTES E LIMITAÇÕES

A busca constante no desenvolvimento de novos estudos que utilizam a microalga para remediação ambiental e a produção de bioenergia, está justificada inicialmente pela capacidade e características das microalgas, onde por exemplo, possui uma característica que se destaca quando comparada com outras biomassas, que é a sua capacidade de crescimento acelerado, o que conseqüentemente garante uma maior produção de bioenergia.

Alinhado a isso, a capacidade de absorção de CO₂ é um ponto forte a ser destacado, já que o dióxido de carbono é um dos principais inimigos do planeta, transformando as microalgas em uma ótima solução sustentável. Cabe salientar, que as microalgas, quando implementadas de maneira integrada, pode auxiliar em pelo menos três aplicações importantes, que é a busca pela redução de CO₂, o tratamento de águas residuais e a obtenção da biomassa para produção de bioenergia.

Cabe também salientar que o uso de microalgas para bioenergia e tratamento de águas residuais está diretamente alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente aos ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 7 (Energia Acessível e Limpa) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

Apesar de possuir grande potencial, sua aplicação em larga escala ainda enfrenta desafios significativos. Uma das principais intempéries observadas, é o alto custo durante a produção, pois envolve investimentos em infraestrutura, além das etapas de colheita, secagem e extração de biocompostos, tornando a viabilidade econômica uma questão importante para a aplicação dessa tecnologia. Além disso, a certeza quanto a eficiência do processo pode ser um problema, uma vez que alguns fatores como tipo de efluente, disponibilidade de luz, temperatura e concentração de nutrientes influenciam diretamente no crescimento das microalgas assim como na remoção dos contaminantes.

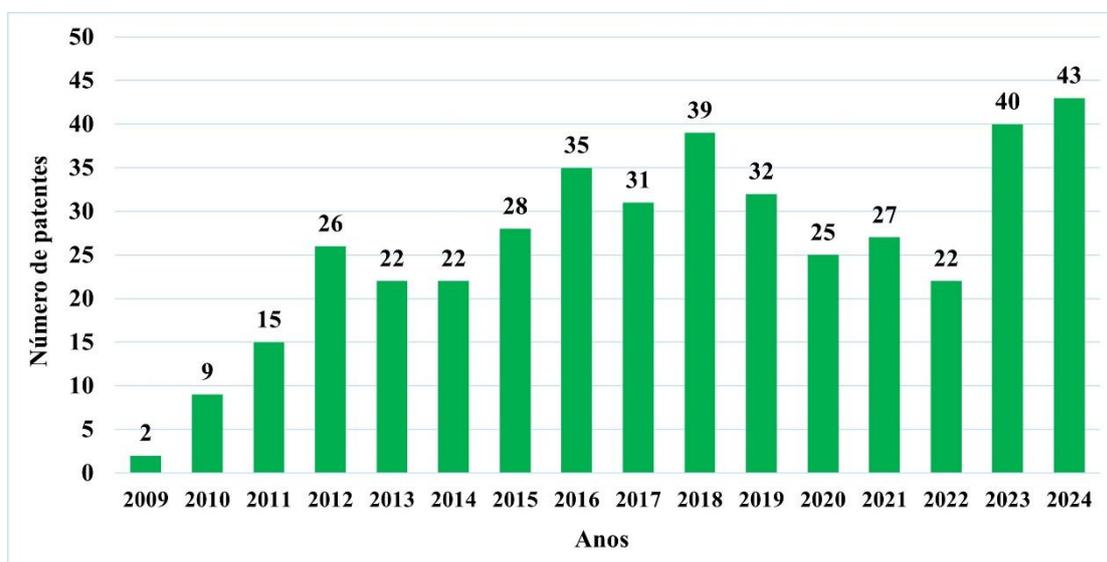
Do ponto de vista tecnológico, existe a necessidade de melhorias nos sistemas de fotobiorreatores e nos métodos de colheita, que atualmente são os responsáveis pela dificuldade quanto ao uso em larga escala destas tecnologias. Essas limitações tornam a aplicação destes experimentos laboratoriais para um nível comercial um desafio.

7. PATENTES EM TECNOLOGIAS BASEADAS EM MICROALGAS

Visando identificar o comportamento da implementação dos estudos acadêmicos, realizou-se uma busca no banco de dados de patentes na Espacenet, com o objetivo de identificar patentes relevantes, alinhadas com o escopo da revisão bibliométrica. A busca utilizou a seguinte combinação de palavras-chave: (“Microalgae” OU “Microalga”) AND (“bioenergy” OU “biodiesel” OU “hydrogen” OU “biomass” OU “biofuel”) AND (“wastewater” OU “wastewater treatment”), filtrada para cobrir os últimos 15 anos (2009-2024). Essa busca resultou em 418 patentes.

O gráfico disposto na figura 12, apresenta a evolução das patentes relacionadas ao tema ao longo dos anos. Observa-se um crescimento expressivo no número de patentes entre 2009 e 2018, visualizando desta maneira um aumento no interesse e nas inovações na área proposta. Após uma leve diminuição entre 2019 e 2022, há uma retomada significativa em 2023 e 2024, com um valor máximo de 43 patentes no último ano analisado. Esse comportamento indica que a pesquisa e o desenvolvimento nessa área continuam relevantes, impulsionados provavelmente por avanços tecnológicos, além de uma maior consciência ambiental acompanhado da necessidade de identificar novas soluções sustentáveis. Esse valor expressivo de patentes evidencia um potencial contínuo para inovações, especialmente na aplicação de tecnologias limpas e no reaproveitamento dos recursos obtidos nos processos.

Figura 12. Número anual de famílias de patentes



Fonte: Autor (2025)

Outra análise foi realizada visando identificar como ocorre a distribuição de patentes por país, a figura 13 (A) apresenta os dados com os 10 principais países segundo o seu número de publicações. Observa-se como destaque a República da Coreia, com um total significativo de 77 patentes registradas, mais do que o dobro do segundo colocado, que é os Estados Unidos da América (35 patentes). Em terceiro lugar, e não menos importante, encontra-se a França, com um total de 29 patentes. Esses dados demonstram a forte capacidade de inovação e investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento por parte desses países.

Países como Japão, Espanha, China e Itália apresentam números menores, porém relevantes, indicando que possuem uma base sólida de desenvolvimento tecnológico. Já países como Romênia, México e Federação Russa possuem registros mais baixos, indicando possivelmente uma menor participação em inovações tecnológicas específicas ou até mesmo uma dependência do uso de tecnologias de outros países. Outra análise importante a se destacar é o número de inventores por país, na figura 13 (B) é possível visualizar mais uma vez a dominância da República da Coreia, apresentando um total de 60 inventores, seguidos por Estados Unidos e França, contendo 32 e 28 respectivamente.

O destaque da República da Coreia pode ser justificado pelas políticas governamentais de incentivo à inovação, além da presença de empresas multinacionais em investir em novas pesquisas. Esses dados sugerem principalmente uma necessidade de colaboração entre os países, visando fortalecer e divulgar o conhecimento, permitindo um acesso global a estas tecnologias inovadoras.

Quanto a análise os principais inventores, a figura 13 (C) apresenta os 10 principais inventores, logo é possível identificar o destaque para Huang Jiamjun como o inventor com maior número de patentes registradas (11), seguido por um conjunto de inventores, incluindo Huang Yun, Liao Qiang, Liu Bingfeng, Wei Dong, Xia Ao, Zhang Jian e Zhu Xun, todos com 6 patentes cada. Outros nomes, como Choi Hee Jeong e Huang Xugeng, aparecem com 5 patentes. A liderança de Huang Jiamjun demonstra uma contribuição significativa para o avanço tecnológico na área, indicando possivelmente um direcionamento para uma inovação contínua, contribuindo com soluções patenteáveis.

Outro fato importante a ser analisado, é quanto aos requerentes de patentes, na figura 13 (D) observa-se o destaque para a empresa Nanning Overseas Chinese Invest Zone Zhengsun Trading Co. Ltd., com 11 patentes, evidenciando sua liderança na geração de inovações. Algumas universidades, como Chongqing, Jiangsu, Tianjin e Zhejiang, apresentaram sua contribuição significativa, garantindo o papel das instituições

acadêmicas no desenvolvimento de tecnologias aplicáveis. Além disso, outras empresas como China Petroleum & Chemical Corporation e Roquette Frères são importantes pois apresentam sua relevância no setor industrial, realizando investimento em pesquisa e desenvolvimento, sugerindo assim uma cooperação entre academia e indústria.

Uma análise das 10 patentes mais relevantes foi realizada, conforme apresentado na tabela 6, observa-se uma rica diversidade de abordagens relacionadas ao uso de microalgas, principalmente em processos de tratamento de águas residuais e produção de biocombustíveis. Ao analisar mais profundamente, é possível identificar padrões, inovações e tendências que revelam o estado do desenvolvimento tecnológico no campo.

Inicialmente, percebe-se uma clara convergência entre a utilização de microalgas para remediação de efluentes e a produção de produtos de outros produtos agregados, como por exemplo, o biodiesel. As patentes de Lee e Choi (2014) e Jeon et al. (2012) destacam os sistemas de cultivo de microalgas utilizando águas residuais, incluindo efluentes de drenagem de minas abandonadas (LEE; CHOI, 2015). A escolha por fontes de águas residuais específicas reflete tanto uma preocupação com o aproveitamento de recursos já existentes quanto a busca por condições de cultivo que promovam um crescimento otimizado das microalgas. O uso combinado de águas residuais e drenagem de minas sugere uma abordagem integrada para resolver dois problemas ambientais simultaneamente: o tratamento de efluentes e a produção sustentável de biomassa (JEON; JI; YUN, 2014).

Outro fator que se pode visualizar é o aprimoramento de condições específicas de cultivo, um exemplo claro disso é a patente de ZHOU et al. (2019), que aborda o tratamento de águas residuais ricas em amônia, refletindo o desafio de lidar com compostos tóxicos que podem inibir o crescimento de microalgas. A utilização de técnicas de adsorção para reduzir os efeitos da amônia apresenta uma abordagem engenhosa que visa adaptar as condições do meio às necessidades do organismo cultivado (ZHOU *et al.*, 2019). Similarmente, outra patente explora a regulação da salinidade no cultivo de microalgas, evidenciando a flexibilidade dessas tecnologias em se adaptar a diferentes ambientes, incluindo águas salinas, que muitas vezes são subutilizadas devido às suas características químicas (JEON; JI; YUN, 2014).

Ao analisar as patentes que se concentram no desenvolvimento de tecnologias específicas para recuperação de materiais ou até mesmo com foco na integração com outros processos, como por exemplo, a geração de biogás, percebe-se um esforço para aproveitar ao máximo a biomassa obtida. A patente que ocupa a oitava posição, por

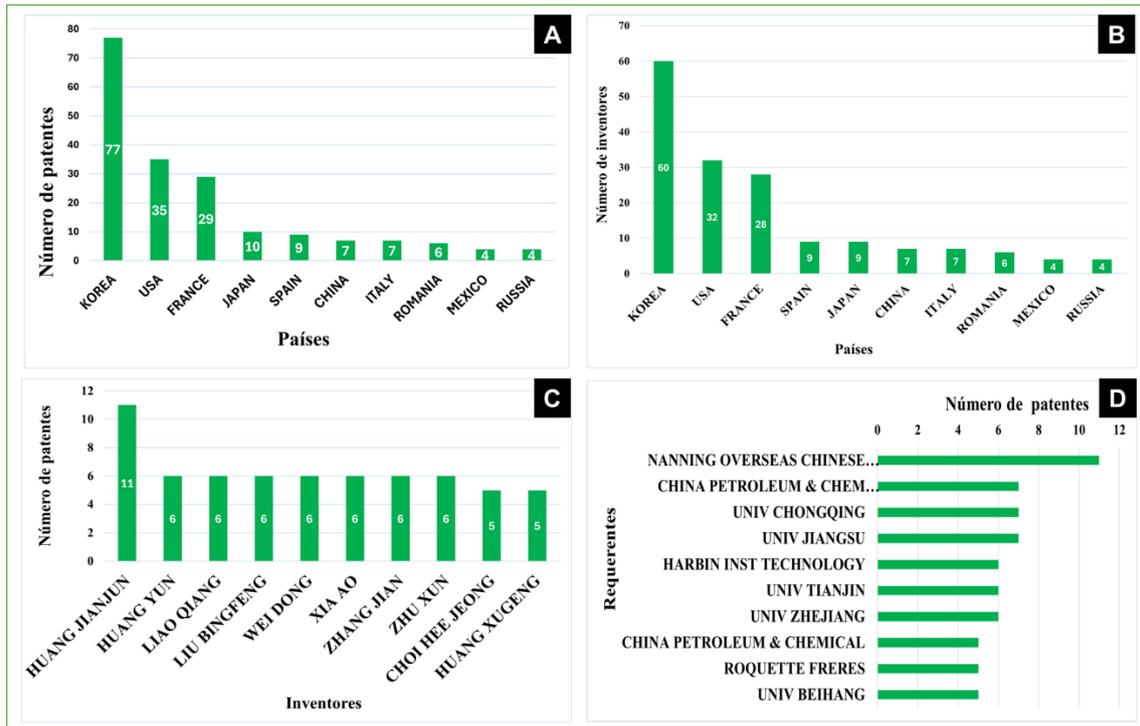
exemplo, propõe um método de biotratamento de biogás líquido com microalgas, onde seu uso não seria apenas visando purificar o resíduo, mas também utiliza as microalgas como uma etapa intermediária para potencialmente gerar biomassa que pode ser convertida em energia (ZHAO *et al.*, 2014). Esse tipo de abordagem evidencia a busca por sistemas integrados, em que cada componente do processo é aproveitado com sinergia.

Outra patente traz uma perspectiva de inovação biológica ao propor o cultivo de novas espécies de microalgas de água doce para produção de óleo (HUANG *et al.*, 2023). Isso traz à tona o interesse contínuo em desenvolver cepas mais produtivas ou até mesmo mais resilientes a condições ambientais adversas. A descoberta de novas espécies também indica a necessidade de ampliar a base de recursos disponíveis, buscando características específicas, como por exemplo, uma melhoria no acúmulo de lipídios ou maior tolerância a poluentes.

Do ponto de vista geográfico e institucional das patentes, verifica-se assim como apresentado na revisão bibliométrica, o papel principal da China e da Coreia do Sul como líderes na inovação tecnológica nesse setor. Instituições como a Yonsei University, contando com duas patentes entre as mais relevantes, demonstram um esforço coordenado para explorar variadas vertentes da aplicação das microalgas, incluindo o controle de salinidade (JEON; JI; YUN, 2014), uso de drenagem de minas e recuperação de materiais (JEON *et al.*, 2014). Essa concentração de patentes em uma única instituição evidencia a existência de programas de pesquisa bem estruturados e focados na aplicação prática.

As patentes analisadas demonstram um forte potencial inovador ao reproduzirem os avanços da pesquisa acadêmica em soluções aplicáveis para o tratamento de águas residuais assim como seu uso integrado para a produção de biocombustíveis a partir de microalgas. A evolução tecnológica observada reflete o aprofundamento dos estudos científicos, destacando desta maneira a importância da pesquisa acadêmica na criação de novas metodologias de cultivo, na recuperação de materiais e otimização das condições ambientais visando melhorias no crescimento das microalgas. No entanto, para que essas inovações se transformem em produtos comercializáveis e alcancem um impacto real no setor energético, faz-se necessária que ocorra uma maior interação entre academia, indústria e no meio legal. O fortalecimento das colaborações entre pesquisadores, empresas e órgãos reguladores pode acelerar as melhorias e implementação destas tecnológicas, garantindo viabilidade econômica e facilitando a implementação dessas tecnologias em larga escala.

Figura 13. Paineis com principais análises de patentes (A). Top 10 dos países com maior número de patentes; (B). Top 10 dos países com maior número de inventores; (C). Top 10 dos inventores mais relevantes; (D). Top 10 dos principais requerentes de patentes.



Fonte: Autor (2025)

Tabela 6. As 10 patentes mais relevantes na área

N	TÍTULO	INVENTORES	REQUERENTES	NÚMERO DE PUBLICAÇÃO	DATA DE PUBLICAÇÃO	NÚMERO DA FAMÍLIA	REF
1	Microalgae culturing system using wastewater and culturing method therefor	Lee Sung Jae; Choi Nag Choul;	AE CORP [KR]	WO2015108279A1	2015-07-23	051743032	(LEE; CHOI, 2015)
2	Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for bio-fuel applications	Chinnasamy Senthil; Bhatnagar Ashish; Hunt Ryan W; Claxton Ronald; Marlowe Mark; Das Keshav C;	CHINNASAMY SENTHIL	US2010267122A1	2010-10-21	042981287	(CHINNASAMY <i>et al.</i> , 2010)
3	Microalgae treatment device for mariculture wastewater purification and biodiesel conversion	Lin Aijun; Qian Tuzheng; Mei Yuyuan; Qie Hantong;	UNIV BEIJING CHEM TECH	CN221117183U	2024-06-11	091365626	(LIN <i>et al.</i> , 2024)
4	Culturing method of microalgae for producing bio-diesel by using wastewater and abandoned mine drainage	Jeon Byong Hun; Ji Min Kyu; Yun Hyun Shik;	UNIV YONSEI WONJU INDUSTRY ACADEMIC COOPERATION FOUNDATION [KR]	KR101382533B1 KR20140022211A	2014-02-24 2014-04-25	050268254	(JEON; JI; YUN, 2014)

N	TÍTULO	INVENTORES	REQUERENTES	NÚMERO DE PUBLICAÇÃO	DATA DE PUBLICAÇÃO	NÚMERO DA FAMÍLIA	REF
5	Method for culturing microalgae by adsorption treatment of ammonia nitrogen wastewater	Zhou Wenguang; Han Pei; Lu Qian; Leng Lijian; Li Jingjing; Li Jun; Zhong Huiqi;	UNIV NAN- CHANG	CN109912136A	2019-06-21	066978985	(ZHOU <i>et al.</i> , 2019)
6	Method for producing bioenergy through microalgae two-step method	Jinfeng Geng; Pengpeng Guo; Jing Li; Minsheng Liu; Weijing Ma; Qiaoli Yang;	ENN RES & DEV CO LTD	CN101760432A CN101760432B	2010-06-30 2013-06-19	042491812	(GENG <i>et al.</i> , 2010)
7	Method for recovering valuable materials and treating waste water using microalgae for producing biodiesel	Jeon Byong Hun; Ji Min Kyu; Hwang Jae Hoon; Choi Jeong A; Kim Hyun Chul;	UNIV YONSEI WONJU INDUS- TRY ACA- DEMIC COOP- ERATION FOUNDATION [KR]	KR20140025179A	2014-03-04	050640480	(JEON <i>et al.</i> , 2014)

N	TÍTULO	INVENTORES	REQUERENTES	NÚMERO DE PUBLICAÇÃO	DATA DE PUBLICAÇÃO	NÚMERO DA FAMÍLIA	REF
8	Biotreatment method for efficiently purifying biogas slurry with microalgae	Zhao Yongjun; Zhang Yuejin; Zhang Hui; Ge Zhigang; Wang Juan; Xu Jie; Zhao Guohua; Sun Shiqing;	UNIV JIAXING	CN103663715A	2014-03-26	050302621	(ZHAO <i>et al.</i> , 2014)
9	Novel freshwater oil-producing microalgae species as well as culture method and application thereof	Huang Jin; Lan Xin; Lin Yuling; Zheng Linling; Li Li; Ma Wenbiao;	UNIV CHEN- GDU	CN114164115A CN114164115B	2022-03-11 2023-05-16	080485270	(HUANG <i>et al.</i> , 2023)
10	Method of and apparatus for wastewater treatment by microalgae membrane bioreactor process	Choi Hee Jeong; Lee Seung Mok;	UNIV KWAN- DONG IND FOUNDATION [KR]	KR20150057658A	2015-05-28	053392475	(CHOI; LEE, 2015)

Fonte: Autor (2025)

8. OPORTUNIDADES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

As microalgas vêm se consolidando como uma alternativa promissora para a integração de tecnologias voltadas ao tratamento de águas residuais e à produção de bioenergia, unindo benefícios ambientais e energéticos. Com o desenvolvimento de novos métodos de cultivo associados ao tratamento de efluentes, ocorreram maximizações nos processos, garantindo o máximo aproveitamento da biomassa, garantindo melhorias tanto na quantidade quanto na qualidade. Um dos avanços mais relevantes nessa área é o desenvolvimento de tecnologias que maximizam a eficiência do cultivo de microalgas em cultivos distintos, como por exemplo, em águas residuais salinas e industriais. Essa abordagem permite o aproveitamento de recursos abundantes e com menor utilização, reduzindo a competição por água doce e ampliando a viabilidade do cultivo em regiões áridas.

Considerando a capacidade das microalgas de se desenvolverem mesmo em meios salinos, surge a possibilidade de integrar sistemas de cultivo de microalgas aos rejeitos de processos de dessalinização. O descarte desses rejeitos, com alta concentração de sais e minerais, pode gerar impactos ambientais negativos. Nesse contexto, um estudo voltado para essa integração poderia ser uma solução promissora para mitigar esses impactos, ao reduzir a concentração de sais nos efluentes. Além disso, o cultivo de microalgas permitiria a produção de biomassa, que poderia ser aproveitada na geração de bioenergia.

Entretanto, alguns desafios precisam ser superados para o uso destes métodos, pois ao considerarmos a eficiência de produção em larga escala, os custos associados ao cultivo e à conversão da biomassa, bem como a necessidade de melhorias em processos regulatórios, verifica-se barreiras que exigem soluções inovadoras, assim como uma integração entre academia, indústria e setor público. Nesse sentido, modelos de cooperação entre países, instituições e pesquisadores, integrados a incentivos governamentais, podem promover a adoção dessas tecnologias.

Por fim, as perspectivas futuras apontam para o aperfeiçoamento de tecnologias de cultivo de microalgas em sistemas fechados, que minimizam a contaminação e conseqüentemente, maximizam a produtividade da biomassa. Assim, o uso integrado de microalgas para tratamento de águas residuais e produção de bioenergia surge como uma tecnologia ideal para enfrentar os desafios globais de sustentabilidade.

9. CONCLUSÃO

A análise bibliométrica revelou um crescimento constante nas publicações dentro dessa área de estudo. A revista *Bioresource Technology* se destacou como o periódico mais relevante, apresentando o maior número de citações e de publicações.

A China aparece dominando o cenário de publicações, sendo responsável por 21,6% das produções, além disto, cabe ressaltar que seus estudos apresentam o maior número de citações. Em consonância a isso, uma das universidades chinesas, a Tunghai University, se destacou com o maior número de publicações.

Observou-se a *Chlorella Vulgaris* como a microalga mais utilizadas, quanto a tecnologia de cultivo mais utilizada, confirmou-se como destaque o uso de fotobiorreatores. O estudo evidenciou o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos de cultivos para as microalgas, destacando a versatilidade nos meios em que podem ser aplicadas. Observou-se variados produtos bioenergéticos, garantindo a utilização maximizada dos recursos e de seus subprodutos, otimizando os processos e garantindo uma aplicação efetivamente sustentável. Além disto, verificou-se que as microalgas possuem notável eficiência na remoção de poluentes e na geração de biomassa com elevado valor agregado, surgindo como uma alternativa viável para reduzir os impactos ambientais oriundos do descarte inadequado de águas residuais.

Apesar dos avanços, desafios, como: a escalabilidade dos processos e os custos de produção, ainda precisam ser superados. Nesse sentido, recomenda-se que novos estudos tenham como foco o desenvolvimento de biorreatores mais eficientes, no uso de águas residuais em diferentes condições ambientais, e principalmente, na integração de tecnologias híbridas que possam maximizar a eficiência dos processos.

REFERÊNCIAS

ABED, Azher M.; ALHUYI NAZARI, Mohammad; AHMADI, Mohammad Hossein; MUKHTAR, Azfarizal; KUMAR, Ravinder; GHARIB, Nima. Power generation by utilization of different renewable energy sources in five Middle Eastern countries: Present status, opportunities and challenges. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s. l.], vol. 73, p. 104101, jan. 2025. DOI 10.1016/j.seta.2024.104101. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138824004971>.

ACIÉN FERNÁNDEZ, Francisco Gabriel; GÓMEZ-SERRANO, Cintia; FERNÁNDEZ-SEVILLA, José María. Recovery of Nutrients From Wastewaters Using Microalgae. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], vol. 2, 20 set. 2018. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00059>.

ALAZAIZA, Motasem Y D; ALZGHOUL, Tharaa M; ABU AMR, Salem S; RAMU, Madhusudhan Bangalore. Microalgae cultivation for dairy wastewater treatment: Insight from recent research and bibliometric analysis. **Results in Engineering**, [s. l.], vol. 24, 2024. DOI 10.1016/j.rineng.2024.103052. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85205419655&doi=10.1016%2fj.rineng.2024.103052&partnerID=40&md5=d490281798c408211b3a97011a6b5058>.

ALI, Sameh Samir; MASTROPETROS, Savvas Giannis; SCHAGERL, Michael; SAKARIKA, Myrsini; ELSAMAHY, Tamer; EL-SHEEKH, Mostafa; SUN, Jianzhong; KORNAROS, Michael. Recent advances in wastewater microalgae-based biofuels production: A state-of-the-art review. **Energy Reports**, [s. l.], vol. 8, p. 13253–13280, 1 nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.143>.

ALMOMANI, Fares; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, Homa; AGHBASHLO, Mortaza; OMAR, Abdullah; JOO, Sang Woo; VASSEGHIAN, Yasser; KARIMI-MALEH, Hassan; SHIUNG LAM, Su; TABATABAEI, Meisam; REZANIA, Shahabaldin. Comprehensive insights into conversion of microalgae to feed, food, and biofuels: Current status and key challenges towards implementation of sustainable biorefineries. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], vol. 455, 1 jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140588>.

ARASHIRO, Larissa T.; JOSA, Irene; FERRER, Ivet; VAN HULLE, Stijn W.H.; ROUSSEAU, Diederik P.L.; GARFÍ, Marianna. Life cycle assessment of microalgae systems for wastewater treatment and bioproducts recovery: Natural pigments, biofertilizer and biogas. **Science of the Total Environment**, [s. l.], vol. 847, 15 nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157615>.

ARAÚJO, Raiane Sodré de; SOUSA, Flaviany Luise Nogueira de; VANDERLEY, Paulino Sousa; BENTES, Suzana Oliveira da Silva; GOMES, Luiz Moreira; FERREIRA, Fernanda Carla Lima. Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. **Research, Society and Development**, [s. l.], vol. 11, n  11, p. e468111133893, 29 ago. 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33893>.

ARAÚJO, E. V.; CARNEIRO, S. V.; NETO, D. M.A.; FREIRE, T. M.; COSTA, V. M.; FREIRE, R. M.; FECHINE, L. M.U.D.; CLEMENTE, C. S.; DENARDIN, J. C.; DOS

SANTOS, J. C.S.; SANTOS-OLIVEIRA, R.; ROCHA, Janaina S.; FECHINE, P. B.A. Advances in surface design and biomedical applications of magnetic nanoparticles. **Advances in Colloid and Interface Science**, [s. l.], vol. 328, 1 jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103166>.

ASHOKKUMAR, Veeramuthu; CHEN, Wei Hsin; AL-MUHTASEB, Ala'a H.; KUMAR, Gopalakrishnan; SATHISHKUMAR, Palanivel; PANDIAN, Sivakumar; ANI, Farid Nasir; NGAMCHARUSSRIVICHAI, Chawalit. Bioenergy production and metallic iron (Fe) conversion from *Botryococcus* sp. cultivated in domestic wastewater: Algal biorefinery concept. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], vol. 196, p. 1326–1334, 15 set. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.069>.

ASIH, Devi R; HANDAYANI, Windri; ANANDA, Alyssa Z; YUNIATI, Ratna; HIROTA, Ryuichi; SUMMERFIELD, Tina C; EATON-RYE, Julian J. An insight into potential phosphate bioremediation and renewable energy from agricultural waste via integrated wastewater treatment systems in Indonesia. **Environmental Research Communications**, [s. l.], vol. 6, n° 4, 2024. DOI 10.1088/2515-7620/ad359c. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85189364222&doi=10.1088%2f2515-7620%2fad359c&partnerID=40&md5=c4aeae71b26d47bf956a4199f2f3d27d>.

AYRE, Jeremy Miles; MOHEIMANI, Navid Reza; BOROWITZKA, Michael Armin. Growth of microalgae on undiluted anaerobic digestate of piggery effluent with high ammonium concentrations. **Algal Research**, [s. l.], vol. 24, p. 218 – 226, 2017. DOI 10.1016/j.algal.2017.03.023. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85016761387&doi=10.1016%2fj.algal.2017.03.023&partnerID=40&md5=5c1dcc66c205ac947e4a4462389f015d>.

BANERJEE, Srijoni; GHOSH, Dipankar; PANDIT, Chetan; SAHA, Sagnik; MOHAPATRA, Anwasha; PANDIT, Soumya; SHARMA, Minaxi; SRIDHAR, Kandi; INBARAJ, Baskaran Stephen; PRASAD, Ram. Microalgal pandora for potent bioenergy production: A way forward? **FUEL**, 125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 333, n° 1, fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126253>.

BORGES, Pedro Tavares; SALES, Misaél Bessa; CÉSAR GUIMARÃES, Cláudia Elisa; DE FRANÇA SERPA, Juliana; DE LIMA, Rita Karolinny Chaves; SANDERS LOPES, Ada Amelia; DE SOUSA RIOS, Maria Aleksandra; DESAI, Ajay S.; DA SILVA LIMA, Ana Michele; LORA, Electo Eduardo Silva; DOS SANTOS, José C.S. Photosynthetic green hydrogen: Advances, challenges, opportunities, and prospects. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], vol. 49, p. 433–458, 2 jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.075>.

CALJURI, Maria Lúcia; SILVA, Thiago Abrantes; MAGALHÃES, Iara Barbosa; PEREIRA, Alexia Saleme Aona de Paula; MARANGON, Bianca Barros; ASSIS, Letícia Rodrigues de; LORENTZ, Juliana Ferreira. Bioproducts from microalgae biomass: Technology, sustainability, challenges and opportunities. **Chemosphere**, [s. l.], vol. 305, 1 out. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135508>.

CATUMBA, Batista Dala; SALES, Misael Bessa; BORGES, Pedro Tavares; RIBEIRO FILHO, Manoel Nazareno; LOPES, Ada Amélia Sanders; SOUSA RIOS, Maria Alessandra de; DESAI, Ajay S.; BILAL, Muhammad; SANTOS, José Cleiton Sousa dos. Sustainability and challenges in hydrogen production: An advanced bibliometric analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], vol. 48, n° 22, p. 7975–7992, 12 mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.215>.

CHAMORRO, Kevin; ÁLVAREZ, Ricardo Calderón; AHTTY, Melany Carvajal; QUINGA, Moises. Comprehensive bibliometric analysis of advancements in artificial intelligence applications in medicine using Scopus database. **Franklin Open**, [s. l.], vol. 10, 1 mar. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100212>.

CHEN, Wan Ting; ZHANG, Yuanhui; ZHANG, Jixiang; YU, Guo; SCHIDEMAN, Lance C.; ZHANG, Peng; MINARICK, Mitchell. Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from wastewater treatment system into bio-crude oil. **Bioresource Technology**, [s. l.], vol. 152, p. 130–139, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.111>.

CHEN, Xiuming; TIAN, Wenjie; FANG, Haoyun. Bibliometric analysis of natural language processing using CiteSpace and VOSviewer. **Natural Language Processing Journal**, [s. l.], vol. 10, p. 100123, mar. 2025. DOI 10.1016/j.nlp.2024.100123. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2949719124000712>.

CHINNASAMY, SENTHIL; BHATNAGAR, ASHISH; HUNT, RYAN W; CLAXTON, RONALD; MARLOW, E MARK; DAS, KESHAV C. **Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications**. Estados Unidos: [s. n.], 21 out. 2010.

CHOI, HEE JEONG; LEE, SEUNG MOK. **Method of and apparatus for wastewater treatment by microalgae membrane bioreactor process**. República da Coreia: [s. n.], ago. 2015.

CHOUDHARY, Poonam; PRAJAPATI, Sanjeev Kumar; MALIK, Anushree. Screening native microalgal consortia for biomass production and nutrient removal from rural wastewaters for bioenergy applications. **Ecological Engineering**, [s. l.], vol. 91, p. 221–230, 1 jun. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.056>.

CHU, Fei-Fei; SHEN, Xiao-Fei; LAM, Paul K S; ZENG, Raymond J. Optimization of CO₂ concentration and light intensity for biodiesel production by *Chlorella vulgaris* FACHB-1072 under nitrogen deficiency with phosphorus luxury uptake. **Journal of Applied Phycology**, [s. l.], vol. 26, n° 4, p. 1631 – 1638, 2014. DOI 10.1007/s10811-013-0200-7. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905395242&doi=10.1007%2fs10811-013-0200-7&partnerID=40&md5=50b47675469c29b7f5c4a4d68e612751>.

CUELLAR-BERMUDEZ, Sara P; GARCIA-PEREZ, Jonathan S; RITTMANN, Bruce E; PARRA-SALDIVAR, Roberto. Photosynthetic bioenergy utilizing CO: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON,

OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, vol. 98, p. 53–65, jul. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.034>.

DA SILVA AIRES, Francisco Izaias; DARI, Dayana Nascimento; FREITAS, Isabelly Silveira; DA SILVA, Jessica Lopes; DE MATOS FILHO, José Roberto; DOS SANTOS, Kaiany Moreira; DE CASTRO BIZERRA, Viviane; SALES, Misael Bessa; DE SOUZA MAGALHÃES, Francisco Lucas; DA SILVA SOUSA, Patrick; NETO, Francisco Simão; DE SOUSA JUNIOR, Paulo Gonçalves; CAVALCANTE, Antônio Luthierre Gama; DE CASTRO, Érico Carlos; MELO, Rafael Leandro Fernandes; DOS SANTOS, José Cleiton Sousa. Advanced and prospects in phenol wastewater treatment technologies: unveiling opportunities and trends. **Discover Water**, [s. l.], vol. 4, n° 1, 24 abr. 2024. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00076-y>.

DARI, Dayana Nascimento; FREITAS, Isabelly Silveira; AIRES, Francisco Izaias da Silva; MELO, Rafael Leandro Fernandes; DOS SANTOS, Kaiany Moreira; DA SILVA SOUSA, Patrick; GONÇALVES DE SOUSA JUNIOR, Paulo; LUTHIERRE GAMA CAVALCANTE, Antônio; NETO, Francisco Simão; DA SILVA, Jessica Lopes; CARLOS DE CASTRO, Érico; SANTOS ALEXANDRE, Valdilane; ANA, Ana M.; SERPA, Juliana de França; SOUZA, Maria C.M.de; SANTOS, José C.S.dos. An Updated Review of Recent Applications and Perspectives of Hydrogen Production from Biomass by Fermentation: A Comprehensive Analysis. **Biomass (Switzerland)**, [s. l.], vol. 4, n° 1, p. 132–163, 1 mar. 2024. <https://doi.org/10.3390/biomass4010007>.

DE BAZAN, Nelzy Neyza Vargas Ramirez; RANZAN, Lucas; FARENZENA, Marcelo; TRIERWEILER, Jorge Otávio. Rapid Quantification of Lipids in Microalgae *Scenedesmus* sp. Using Fluorescence. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], vol. 66, 2023. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023220010>.

DOU, Zhenlan; ZHANG, Chunyan; YU, Dongmin; YE, Zihua; WANG, Songcen; FAN, Siyuan. A new co-production (biogas& biodiesel) plant under a microalgae-to-biofuel process designed under a hydrothermal disintegration/ deep eutectic solvent process. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], vol. 193, p. 54–73, 1 jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.016>.

EGLER, Megan; BARBIERI, Lindsay. Prefiguring energy futures: Hybrid energy initiatives and just transitions in fossil fuel regions. **Energy Research and Social Science**, [s. l.], vol. 118, 1 dez. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103830>.

FENFEN, Zhang; GUOSHUANG, Zhu; JIALI, Chen; JIANHONG, Zhang; SIHUI, Dong; SHAOMIN, Cheng. Current status and trends in the modernization of pulse diagnosis research: a bibliometric analysis based on CiteSpace and VOSviewer. **Digital Chinese Medicine**, [s. l.], vol. 6, n° 4, p. 405–415, 1 dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dcm.2024.01.004>.

FENG, Haowen; SUN, Chihe; ZHANG, Chaofan; CHANG, Haixing; ZHONG, Nianbing; WU, Wenbo; WU, Haihua; TAN, Xuefei; ZHANG, Mengying; HO, Shih Hsin. Bioconversion of mature landfill leachate into biohydrogen and volatile fatty acids via microalgal photosynthesis together with dark fermentation. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], vol. 252, 15 jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115035>.

FERNÁNDEZ, F. Gabriel Acién; REIS, Alberto; WIJFFELS, René H.; BARBOSA, Maria; VERDELHO, Vitor; LLAMAS, Bernardo. The role of microalgae in the bioeconomy. **New Biotechnology**, [s. l.], vol. 61, p. 99–107, 25 mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.011>.

FERREIRA, Alice; MARQUES, Paula; RIBEIRO, Belina; ASSEMANY, Paula; DE MENDONÇA, Henrique Vieira; BARATA, Ana; OLIVEIRA, Ana Cristina; REIS, Alberto; PINHEIRO, Helena M.; GOUVEIA, Luisa. Combining biotechnology with circular bioeconomy: From poultry, swine, cattle, brewery, dairy and urban wastewaters to biohydrogen. **Environmental Research**, [s. l.], vol. 164, p. 32–38, 1 jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.007>.

FILIFE, Hugo A.L.; MOREIRA, André F.; MIGUEL, Sónia P.; COUTINHO, Paula. Microalgae lipid membrane models: A computational biophysics characterization. **Algal Research**, [s. l.], vol. 85, 1 jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103884>.

GENG, JINFENG; GUO, PENGPENG; LI, JING; LIU, MINSHENG; MA, WEIJING; YANG, QIAOLI. **Method for producing bioenergy through microalgae two-step method**. China: [s. n.], 30 jun. 2010.

GOSWAMI, Rahul Kumar; MEHARIYA, Sanjeet; VERMA, Pradeep; LAVECCHIA, Roberto; ZUORRO, Antonio. Microalgae-based biorefineries for sustainable resource recovery from wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], vol. 40, 1 abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101747>.

GOUVEIA, Luísa; NEVES, Carole; SEBASTIÃO, Diogo; NOBRE, Beatriz P.; MATOS, Cristina T. Effect of light on the production of bioelectricity and added-value microalgae biomass in a Photosynthetic Alga Microbial Fuel Cell. **Bioresource Technology**, [s. l.], vol. 154, p. 171–177, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.049>.

GUERRA, Witter Duarte; OLIVEIRA, Flávia Costa; CHIESA, Jaqueline Elise Garcia; ALBUQUERQUE, Karolinne Gomes; MARTINS, Alexandre de Matos; ROCHA, Lucas Matheus da; BATISTA, Antônio Carlos Ferreira. Revisão sistemática sobre o emprego e cultivo da microalga *Scenedesmus* sp. na produção de biodiesel. **Revista Sociedade Científica**, [s. l.], vol. 7, nº 1, p. 942–979, 20 fev. 2024. <https://doi.org/10.61411/rsc202426717>.

GUIEYSSE, Benoit; PLOUVIEZ, Maxence. Microalgae cultivation: closing the yield gap from laboratory to field scale. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, [s. l.], vol. 12, 2024. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1359755>.

GUPTA, Suvidha; PAWAR, Sanjay B. An integrated approach for microalgae cultivation using raw and anaerobic digested wastewaters from food processing industry. **BIORESOURCETECHNOLOGY, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND**, vol. 269, p. 571–576, dez. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.113>.

GUPTA, Suvidha; PAWAR, Sanjay B; PANDEY, R A. Current practices and challenges in using microalgae for treatment of nutrient rich wastewater from agro-based industries. **SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT**, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 687, p. 1107–1126, out. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.115>.

GUTIERREZ, James; KWAN, Thomas A; ZIMMERMAN, Julie B; PECCIA, Jordan. Ammonia inhibition in oleaginous microalgae. **Algal Research**, [s. l.], vol. 19, p. 123 – 127, 2016. DOI 10.1016/j.algal.2016.07.016. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84982786859&doi=10.1016%2fj.algal.2016.07.016&partnerID=40&md5=f267ead643bc62e6b1e4508821393098>.

HAMIDIAN, Najmeh; ZAMANI, Hajar. Potential of Chlorella sorokiniana Cultivated in Dairy Wastewater for Bioenergy and Biodiesel Production. **BIOENERGY RESEARCH**, ONE NEW YORK PLAZA, SUITE 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES, vol. 15, n° 1, p. 334–345, mar. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10338-5>.

HASSAN, Humeira; ANSARI, Faiz Ahmad; RAWAT, Ismail; BUX, Faizal. Unlocking the potential of microalgae: Cultivation in algae recycled effluent with domestic wastewater for enhancing biomass, bioenergy production and CO2 sequestration. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], vol. 68, 2024. DOI 10.1016/j.jwpe.2024.106499. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85208585957&doi=10.1016%2fj.jwpe.2024.106499&partnerID=40&md5=e4c7d660f326d5dd989bd345e84752ad>.

HUANG, JIN; LAN, XIN; LIN, YULING; ZHENG LINLING; LI, LI; MA, , WENBIAO. **Novel freshwater oil-producing microalgae species as well as culture method and application thereof**. China: [s. n.], 16 maio 2023.

HUCH DUARTE, Victória; VALENTINI, Marlon; SANTOS, Gabriel Borges dos; NADALETTI, Willian Cezar; MULLER VIEIRA, Bruno. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biogás. **Revista Ambientale**, [s. l.], vol. 14, n° 2, p. 22–34, 22 jun. 2022. <https://doi.org/10.48180/ambientale.v14i2.371>.

JEON, BYONG HUN; JI, MIN KYU; HWANG, JAE HOON; CHOI, JEONG A; KIM, HYUN CHUL. **Method for recovering valuable materials and treating waste water using microalgae for producing biodiesel**. República da Coreia: [s. n.], 4 mar. 2014.

JEON, BYONG HUN; JI, MIN KYU; YUN, HYUN SHIK. **Culturing method of microalgae for producing biodiesel by using wastewater and abandoned mine drainage**. República da Coreia: [s. n.], 25 abr. 2014.

JOSA, Irene; GARFI, Marianna. Social life cycle assessment of microalgae-based systems for wastewater treatment and resource recovery. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, 125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 407, jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137121>.

KIM, Byung Hyuk; KANG, Zion; RAMANAN, Rishiram; CHOI, Jong Eun; CHO, Dae Hyun; OH, Hee Mock; KIM, Hee Sik. Nutrient removal and biofuel production in high rate algal pond using real municipal wastewater. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], vol. 24, n° 8, p. 1123–1132, 24 abr. 2014. <https://doi.org/10.4014/jmb.1312.12057>.

KOO, Malcolm; LIN, Shih Chun. Retracted articles in scientific literature: A bibliometric analysis from 2003 to 2022 using the Web of Science. **Heliyon**, [s. l.], vol. 10, n° 20, 30 out. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38620>.

KRELL, Andreas Joachim; DE CASTRO E SOUZA, Carolina Barros. The sustainability of the Brazilian energy matrix: the regulatory framework for renewable energies and the principle of sustainable development. **Revista de Direito Economico e Socioambiental**, [s. l.], vol. 11, n° 2, p. 157–188, 1 maio 2020. <https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v11i2.26872>.

LEE, SUNG JAE; CHOI, NAG CHOUL. **Microalgae culturing system using wastewater and culturing method therefo**. Organização Mundial da Propriedade Intelectual: [s. n.], 23 jul. 2015.

LIN, AIJUN; QIAN, TUZHENG; MEI, YUYUAN; QIE, HANTONG. **Microalgae treatment device for mariculture wastewater purification and biodiesel conversion**. China: [s. n.], 11 jun. 2024.

LIU, Shuang; ABU BAKAR SADDIQUE, Muhammad; LIANG, Yiming; GUAN, Ge; SU, Haotian; HU, Beibei; YANG, Songqi; LUO, Xiumei; REN, Maozhi. Microalgae: A good carrier for biological selenium enrichment. **Bioresource Technology**, [s. l.], vol. 416, 1 jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131768>.

LOGROÑO, Washington; PÉREZ, Mario; URQUIZO, Gladys; KADIER, Abudukeremu; ECHEVERRÍA, Magdy; RECALDE, Celso; RÁKHELY, Gábor. Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater. **Chemosphere**, [s. l.], vol. 176, p. 378–388, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.099>.

MAITY, Jyoti Prakash; BUNDSCHUH, Jochen; CHEN, Chien Yen; BHATTACHARYA, Prosun. Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives - A mini review. **Energy**, [s. l.], vol. 78, p. 104–113, 15 dez. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.003>.

MARTINEZ-VILLARREAL, Sergio; BREITENSTEIN, Antoine; NIMMEGEERS, Philippe; PEREZ SAURA, Pablo; HAI, Bingxin; ASOMANING, Justice; ESLAMI, Ali Alizadeh; BILLEN, Pieter; VAN PASSEL, Steven; BRESSLER, David C.; DEBECKER, Damien P.; REMACLE, Claire; RICHEL, Aurore. Drop-in biofuels production from microalgae to hydrocarbons: Microalgal cultivation and harvesting, conversion pathways, economics and prospects for aviation. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], vol. 165, 1 out. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106555>.

MATHIMANI, Thangavel; PUGAZHENDHI, Arivalagan. Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], vol. 17, p. 326 – 330, 2019. DOI 10.1016/j.bcab.2018.12.007. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85058508955&doi=10.1016%2Fj.bcab.2018.12.007&partnerID=40&md5=2c9e07de13a4e2b6c50d8b3ec4d8a06f>.

MELO, Rafael Leandro Fernandes; NASCIMENTO DARI, Dayana; DA SILVA AIRES, Francisco Izaias; SIMÃO NETO, Francisco; FREIRE, Tiago Melo; FERNANDES, Bruno Caio Chaves; FECHINE, Pierre Basílio Almeida; SOARES, João Maria; SOUSA DOS SANTOS, José Cleiton. Global Advancements in Bioactive Material Manufacturing for Drug Delivery: A Comprehensive Study. **ACS Omega**, [s. l.], vol. 10, nº 1, p. 1207–1225, 14 jan. 2025. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c08669>.

MELO, Rafael Leandro Fernandes; NETO, Francisco Simão; DARI, Dayana Nascimento; FERNANDES, Bruno Caio Chaves; FREIRE, Tiago Melo; FECHINE, Pierre Basílio Almeida; SOARES, João Maria; DOS SANTOS, José Cleiton Sousa. A comprehensive review on enzyme-based biosensors: Advanced analysis and emerging applications in nanomaterial-enzyme linkage. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], vol. 264, 1 abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130817>.

MENEZES FERREIRA, Antonio Átila; DA SILVA FELIX, John Hebert; CHAVES DE LIMA, Rita Karolinny; MARTINS DE SOUZA, Maria Cristiane; SOUSA DOS SANTOS, José Cleiton. Advancements and Prospects in Nanorobotic Applications for Ophthalmic Therapy. **ACS Biomaterials Science and Engineering**, [s. l.], 2025. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.4c02368>.

MORAES, Gisely Souza Campos; SILVA, Messias Borges; MACHADO, Marcela Aparecida Guerreiro; DE MATOS, Sandoval Menezes; CHAVES, Josimar da Silva; SAMPAIO, Edilacy da Silva; DA COSTA, Luiz Antônio Mendonça Alves; LIMA, Valdeídes Marques. Produção de biodiesel a partir das microalgas: revisão. **International Journal of Scientific Management and Tourism**, [s. l.], vol. 9, nº 3, p. 1672–1689, 4 jul. 2023. <https://doi.org/10.55905/ijstvtv9n3-013>.

MORYA, Raj; RAJ, Tirath; LEE, Youngkyu; PANDEY ASHUTOSH KUMAR AND KUMAR, Deepak; SINGHANIA, Reeta Rani; SINGH, Saurabh; VERMA, Jay Prakash; KIM, Sang-Hyoun. Recent updates in biohydrogen production strategies and life-cycle assessment for sustainable future. **BIORESOURCETECHNOLOGY**, 125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 366, dez. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128159>.

MURADOV, Nazim; TAHA, Mohamed; MIRANDA, Ana F; WREDE DIGBY AND KADALI, Krishna; GUJAR, Amit; STEVENSON, Trevor; BALL, Andrew S; MOURADOV, Aidyn. Fungal-assisted algal flocculation: application in wastewater treatment and biofuel production. **BIOTECHNOLOGY FOR BIOFUELS**, CAMPUS, 4 CRINAN ST, LONDON N1 9XW, ENGLAND, vol. 8, fev. 2015. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0210-6>.

MUSTAFA, Hauwa Mohammed; HAYDER, Gasim; MUSTAPA, Siti Indati. Circular Economy Framework for Energy Recovery in Phytoremediation of Domestic Wastewater. **ENERGIES**, ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND, vol. 15, n° 9, maio 2022. <https://doi.org/10.3390/en15093075>.

NAJEEB, M. I.; AHMAD, M. D.; ANJUM, A. A.; MAQBOOL, A.; ALI, M. A.; NAWAZ, M.; ALI, T.; MANZOOR, R. Distribution, screening and biochemical characterization of indigenous microalgae for bio-mass and bio-energy production potential from three districts of Pakistan. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], vol. 84, 2024. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.261698>.

NAJIHA BADAR, Sharifah; MOHAMMAD, Masita; EMDADI, Zeynab; YAAKOB, Zahira. Algae and their growth requirements for bioenergy: a review. **BIOFUELS-UK**, 2-4 PARK SQUARE, MILTON PARK, ABINGDON OR14 4RN, OXON, ENGLAND, vol. 12, n° 3, p. 307–325, mar. 2021. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1472978>.

NASSAR, Yasser Fathi; EL-KHOZONDAR, Hala Jarallah; FAKHER, Masoud Ali. The role of hybrid renewable energy systems in covering power shortages in public electricity grid: An economic, environmental and technical optimization analysis. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 108, p. 1–16, 1 fev. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115224>.

NUNES, André Luiz Figueiredo; LIMA, Viviane Sobreira; JÚNIOR, José Roberto Miranda; RESENDE, Monique Ellen Torres; DA SILVA, César Augusto Sodré; MARTINS, Márcio Arêdes; COIMBRA, Jane Selia Dos Reis. Cell disruption of microalgae: advances and perspectives. **Ciencia Rural**, [s. l.], vol. 54, n° 5, 2024. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220330>.

OLIVEIRA, Alzira Marques de; MARIO, Maurício Conceição; PACHECO, Marcos Tadeu Tavares. Fontes renováveis de energia elétrica: evolução da oferta de energia fotovoltaica no Brasil até 2050 / Renewable electric energy sources: evolution of the supply of photovoltaic energy in Brazil until 2050. **Brazilian Applied Science Review**, [s. l.], vol. 5, n° 1, p. 257–272, 2021. <https://doi.org/10.34115/basrv5n1-016>.

PALANDI, Zahra Khodabakhshi; TAGHAVIJELOUDAR, Mohsen. Enhancing microalgae-based biofuels production, wastewater treatment and bio-products generation by synergistic effect of iron and zinc addition to real municipal wastewater. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], vol. 370, 1 nov. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122350>.

PASSOS, Fabiana; FERRER, Ivet. Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production. **Water Research**, [s. l.], vol. 68, p. 364–373, 1 jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.015>.

PASSOS, Fabiana; HERNÁNDEZ-MARINÉ, Mariona; GARCÍA, Joan; FERRER, Ivet. Long-term anaerobic digestion of microalgae grown in HRAP for wastewater treatment. Effect of microwave pretreatment. **Water Research**, [s. l.], vol. 49, 1 fev. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.013>.

PAWAR, Sanjay. Effectiveness mapping of open raceway pond and tubular photobioreactors for sustainable production of microalgae biofuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], vol. 62, p. 640 – 653, 2016. DOI 10.1016/j.rser.2016.04.074. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84979783258&doi=10.1016%2Fj.rser.2016.04.074&partnerID=40&md5=3d1580eba84492e9ea25dfda255064f2>.

PEA-ASSOUNGA, Jean Baptiste Bernard; BAMBI, Prince Dorian Rivel; JAFARZADEH, Elham; NIMA NGAPEY, Jonathan Dior. Investigating the impact of crude oil prices, CO2 emissions, renewable energy, population growth, trade openness, and FDI on sustainable economic growth. **Renewable Energy**, [s. l.], vol. 241, p. 122353, mar. 2025. DOI 10.1016/j.renene.2025.122353. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148125000151>.

PESSOA, Luiggi Cavalcanti; CRUZ, Eric Pinheiro; DEAMICI, Kricelle Mosquera; ANDRADE, Bianca Bomfim; CARVALHO, Natalia Santana; VIEIRA, Suellen Rocha; DA SILVA, Jania Betania Alves; PONTES, Luiz Antonio Magalhaes; DE SOUZA, Carolina Oliveira; DRUZIAN, Janice Izabel; ASSIS, Denilson de Jesus. A review of microalgae-based biorefineries approach for produced water treatment: Barriers, pretreatments, supplementation, and perspectives. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING**, 125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 10, nº 4, ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108096>.

QIU, Shuang; WANG, Lingfeng; CHAMPAGNE, Pascale; CAO GUIHUA AND CHEN, Zhipeng; WANG, Shuying; GE, Shijian. Effects of crystalline nanocellulose on wastewater-cultivated microalgal heck for separation and biomass composition. **APPLIED ENERGY**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, vol. 239, p. 207–217, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.212>.

RAEISI, Maryam; HUANG, Jiawei; FRANKE, Meik B.; ZONDERVAN, Edwin. Valuable bioproducts from microalgae - A superstructure optimization approach. **Algal Research**, [s. l.], vol. 75, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103259>.

RAHEEM, Abdul; PRINSEN, Pepijn; VUPPALADADIYAM, Arun K; ZHAO, Ming; LUQUE, Rafael. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: Recent developments. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, vol. 181, p. 42–59, abr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.125>.

RAZA, Bilal; RAMZAN, Muhammad Naeem; YANG, Wen. A review: Improving aquaculture rearing water quality by removal of nutrients using microalgae, challenges and future prospects. **Aquaculture**, [s. l.], vol. 598, 15 mar. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741959>.

RUALES, Evelyn; GOMEZ-SERRANO, Cintia; MORILLAS-ESPANA, Ainoa; GONZALEZ-LOPEZ, Cynthia; CASAS, Monica Escola; MATAMOROS VICTOR AND GARFI, Marianna; FERRER, Ivet. Resource recovery and contaminants of

emerging concern mitigation by microalgae treating wastewater. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT**, 24-28 OVAL RD, LONDON NW1 7DX, ENGLAND, vol. 367, set. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121950>.

SABA, Beenish; CHRISTY, Ann D; YU, Zhongtang; CO, Anne C. Sustainable power generation from bacterio-algal microbial fuel cells (MFCs): An overview. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, vol. 73, p. 75–84, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.115>.

SANCHES, Ítalo Sabião; SANCHES, Édipo Sabião; OMIDO, Agleison Ramos; BARBOZA, Christian Souza; JORDAN, Rodrigo Aparecido. Prelúdio para utilização da energia geotérmica superficial na climatização do ambiente construído na Cidade de Naviraí, Estado do Mato Grosso do Sul, Brasil. **Research, Society and Development**, [s. l.], vol. 9, nº 10, p. e4909108864, 4 out. 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8864>.

SELVARATNAM, T; PEGALLAPATI, A K; REDDY, H; KANAPATHIPILLAI, N; NIRMALAKHANDAN, N; DENG, S; LAMMERS, P. J. Algal biofuels from urban wastewaters: Maximizing biomass yield using nutrients recycled from hydrothermal processing of biomass. **BIORESOURCE TECHNOLOGY**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, vol. 182, p. 232–238, abr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.134>.

SEO, Yu-Hee; DO, Jeong-Mi; SUH, Ho-Seong; PARK, Su-Bin; YOON, Ho-Sung. Treatment of Swine Wastewater Using the Domestic Microalga *Halochlorella rubescens* KNUA214 for Bioenergy Production and Carotenoid Extraction. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], vol. 14, nº 24, 2024. DOI 10.3390/app142411650. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85213235363&doi=10.3390%2fapp142411650&partnerID=40&md5=ec2a33f2dce14bb2c8b4278c82c118e1>.

SHETTY, Prateek; BOBOESCU, Iulian Z; PAP, Bernadett; WIRTH, Roland; KOVACS, Kornel L; BIRO, Tibor; FUTO, Zoltan; WHITE III, Richard Allen; MAROTI, Gergely. Exploitation of Algal-Bacterial Consortia in Combined Biohydrogen Generation and Wastewater Treatment. **FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH**, AVENUE DU TRIBUNAL FEDERAL 34, LAUSANNE, CH-1015, SWITZERLAND, vol. 7, jun. 2019. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00052>.

SOLÉ-BUNDÓ, Maria; SALVADÓ, Humbert; PASSOS, Fabiana; GARFÍ, Marianna; FERRER, Ivet. Strategies to optimize microalgae conversion to biogas: Co-digestion, pretreatment and hydraulic retention time. **Molecules**, [s. l.], vol. 23, nº 9, 2018. DOI 10.3390/molecules23092096. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85052819087&doi=10.3390%2fmolecules23092096&partnerID=40&md5=b06cb3038f1811bf76a0aacfbbaea2b7>.

TOMAR, Sakshi; AGARWAL, Shruti; SINGH, Harshita; KUMAR, Reetesh; QURESHI, Kamal A.; JAREMKO, Mariusz; EMWAS, Abdul Hamid; RAI, Pankaj Kumar. Microalgae: A promising source for biofuel production. **Biocatalysis and**

Agricultural Biotechnology, [s. l.], vol. 53, 1 out. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102877>.

UEMURA, Takumi; TAKABE, Yugo; OKAZAKI, Hironori; MATSUMURA, Nobuhiro; MASUDA, Takanori; HOSHIKAWA, Yoshiko. Influences of changing inorganic nitrogen concentration on accumulation and degradation of organic components in indigenous microalgae cultivated with secondary effluent. **ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY**, 2-4 PARK SQUARE, MILTON PARK, ABINGDON OR14 4RN, OXON, ENGLAND, vol. 44, n° 16, p. 2462–2472, jul. 2023.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2034977>.

UGGETTI, Enrica; SIALVE, Bruno; HAMELIN, Jérôme; BONNAFOUS, Anaïs; STEYER, Jean-Philippe. CO₂ addition to increase biomass production and control microalgae species in high rate algal ponds treating wastewater. **Journal of CO₂ Utilization**, [s. l.], vol. 28, p. 292 – 298, 2018. DOI 10.1016/j.jcou.2018.10.009.
Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85055451910&doi=10.1016%2Fj.jcou.2018.10.009&partnerID=40&md5=4756973f4b1c6992d850d67ad37a1397>.

UMETANI, Ikumi; SPOSOB, Michal; TIRON, Olga. Indigenous Green Microalgae for Wastewater Treatment: Nutrient Removal and Resource Recovery for Biofuels and Bioproducts. **BIOENERGY RESEARCH**, ONE NEW YORK PLAZA, SUITE 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES, vol. 16, n° 4, SI, p. 2428–2438, dez. 2023.
<https://doi.org/10.1007/s12155-023-10611-9>.

XIE, Peng; CHEN, Chuan; ZHANG, Chaofan; SU, Guanyong; REN, Nanqi; HO, Shih Hsin. Revealing the role of adsorption in ciprofloxacin and sulfadiazine elimination routes in microalgae. **Water Research**, [s. l.], vol. 172, 1 abr. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115475>.

XU, Hang; LIU, Chen; WANG, Ao; YUE, Baofeng; LIN, Tao; DING, Mingmei. Microalgae treatment of food processing wastewater for simultaneous biomass resource recycling and water reuse. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], vol. 369, 1 out. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122394>.

YANG, Zhigang; PEI, Haiyan; HOU, Qingjie; JIANG, Liquan; ZHANG, Lijie; NIE, Changliang. Algal biofilm-assisted microbial fuel cell to enhance domestic wastewater treatment: Nutrient, organics removal and bioenergy production. **CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL**, PO BOX 564, 1001 LAUSANNE, SWITZERLAND, vol. 332, p. 277–285, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.096>.

YE, Min; LI, Qian; LI, Yu-You. Evaluation of anaerobic membrane bioreactor treating dairy processing wastewater: Elemental flow, bioenergy production and reduction of CO₂ emission. **BIORESOURCE TECHNOLOGY**, 125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 385, out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129342>.

ZHANG, Bing; LI, Wei; GUO, Yuan; ZHANG, Zhiqiang; SHI, Wenxin; CUI, Fuyi; LENS, Piet N L; TAY, Joo Hwa. Microalgal-bacterial consortia: From interspecies interactions to biotechnological applications. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON,

OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, vol. 118, fev. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109563>.

ZHAO, YONGJUN; ZHANG, YUEJIN; ZHANG, HUI; GE, ZHIGANG; WANG, JUAN; XU, JIE; ZHAO, GUOHUA; SUN, SHIQING. **Biotreatment method for efficiently purifying biogas slurry with microalgae**. China: [s. n.], 26 mar. 2014.

ZHOU, Weizheng; WANG, Zhongming; ZHU, Shunni; HUO, Shuhao; YUAN, Zhenhong; XIE, Jun. Culture of four microalgal strains for bioenergy production and nutrient removal in the meliorative municipal wastewater. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, [s. l.], vol. 38, n° 5, p. 670 – 679, 2016. DOI 10.1080/15567036.2012.754517. Disponível em:
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84962921735&doi=10.1080%2f15567036.2012.754517&partnerID=40&md5=342540928b0e6f07b2e0fd68df718eb1>.

ZHOU, WENGUANG; HAN, PEI; LU, QIAN; LENG, LIJIAN; LI, JINGJING; LI, JUN; ZHONG, HUIQI. **Method for culturing microalgae by adsorption treatment of ammonia nitrogen wastewater**. China: [s. n.], 21 jun. 2019.

ZHOU, Yingdong; XIAO, Haiting; LIU, Qing; WANG, Lan; GONG, Yuan; REMÓN, Javier. Synergistic production of nitrogen-rich hydrochar and solid biofuels via co-hydrothermal carbonization of microalgae and macroalgae: When nitrogen circularity matters. **Environmental Research**, [s. l.], vol. 268, 1 mar. 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120749>.