

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

CULTIVO DE MICROALGAS: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA CAPTURA DE CO₂ E PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

AUTORES:

Lídia Gabriela Rodrigues de Souza 1, Karine Fonseca Soares de Oliveira 1, Guilherme Quintela Calixto 1, Leila Laíse Souza Santos 1, Vítor Rodrigo de Melo e Melo 1, Dulce Maria de Araújo Melo 1,2, Renata Martins Braga 1,3.

INSTITUIÇÃO:

1 - Laboratório de Tecnologia Ambiental, UFRN; 2 - Instituto de Química, UFRN e 3 - Escola Agrícola de Jundiá, UFRN.

CULTIVO DE MICROALGAS: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA CAPTURA DE CO₂ E PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Resumo

O cultivo de microalgas é uma solução inovadora para a captura de dióxido de carbono (CO₂) e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, desempenhando um papel importante na promoção de um futuro mais sustentável. Microalgas são organismos fotossintéticos unicelulares que utilizam a luz solar para converter CO₂ e água em biomassa e oxigênio. Diferente das plantas terrestres, podem ser cultivadas em ambientes aquáticos, efluentes industriais, águas doces ou salgadas, não necessita de terras agrícolas, sendo especialmente vantajoso em regiões onde esse recurso é escasso. Além disso, as microalgas apresentam uma taxa de crescimento rápida, permitindo múltiplas colheitas anuais, tornando seu cultivo uma opção produtiva e sustentável. Elas podem ser cultivadas em sistemas abertos, como lagoas, ou fechados como os fotobiorreatores, a escolha do tipo de sistema depende de fatores como condições ambientais locais e objetivos específicos de produção. Além de capturar CO₂, as microalgas oferecem diversos benefícios, como a produção de biocombustíveis. O alto teor lipídico das microalgas as torna matéria-prima ideal para biodiesel e outros biocombustíveis, contribuindo para substituir combustíveis fósseis, reduzir emissões de gases de efeito estufa, e diminuir a dependência de fontes não renováveis de energia. O objetivo deste trabalho é investigar na literatura o cultivo de microalgas e seu impacto na captura de CO₂. Para tal, foram realizadas análises bibliométricas sobre espécies mais adequadas a diferentes condições de cultivo, seja em ambientes naturais vulneráveis ou em condições controladas, bem como sua relação com a produção de energia renovável e biocombustíveis. A análise bibliométrica usou métodos quantitativos para medir a produção e o impacto de publicações, identificando tendências, padrões de colaboração, trabalhos relevantes e lacunas na pesquisa sobre o tema. Em resumo, o cultivo de microalgas pode ser uma solução sustentável para a captura de CO₂ e produção de biocombustíveis. Abordagem que contribui para as discussões sobre mitigação das mudanças climáticas. Que possibilita a integração do cultivo de microalgas em estratégias de desenvolvimento sustentável pode acelerar a transição para uma economia de baixo carbono e a conservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: análise bibliométrica, sustentabilidade, energia renovável, captura de CO₂.

Abstract

The cultivation of microalgae is an innovative solution for carbon dioxide (CO₂) capture and the mitigation of greenhouse gas emissions, playing an important role in promoting a more sustainable future. Microalgae are unicellular photosynthetic organisms that use sunlight to convert CO₂ and water into biomass and oxygen. Unlike terrestrial plants, they can be cultivated in aquatic environments, industrial effluents, fresh or saltwater, and do not require agricultural land, making them particularly advantageous in regions where this resource is scarce. Additionally, microalgae have a rapid growth rate, allowing for multiple annual harvests, making their cultivation a productive and sustainable option. They can be grown in open systems, such as ponds, or closed systems like photobioreactors, with the choice of system depending on factors such as local environmental conditions and specific production goals. In addition to capturing CO₂, microalgae offer various benefits, such as biofuel production. The high lipid content of microalgae makes them an ideal feedstock for biodiesel and other biofuels, contributing to the replacement of fossil fuels, reducing greenhouse gas emissions, and decreasing dependence on non-renewable energy sources. The aim of this work is to investigate the literature on microalgae cultivation and its impact on CO₂ capture. To this end, bibliometric analyses were conducted

on species most suitable for different cultivation conditions, whether in vulnerable natural environments or controlled conditions, as well as their relationship with renewable energy and biofuel production. The bibliometric analysis used quantitative methods to measure the production and impact of publications, identifying trends, collaboration patterns, relevant works, and research gaps on the topic. In summary, microalgae cultivation can be a sustainable solution for CO₂ capture and biofuel production. This approach contributes to discussions on climate change mitigation, and integrating microalgae cultivation into sustainable development strategies can accelerate the transition to a low-carbon economy and the conservation of natural resources.

Keywords: bibliometric analysis, sustainability, renewable energy, CO₂ capture.

Introdução

O Brasil é o quinto maior país do mundo em extensão territorial com 8,5 milhões de km², possui litoral com 7.367 km, banhado a leste pelo Oceano Atlântico. Quando nos referimos a extensão territorial do contorno da costa litorânea, esse número sobe para 9,2 mil km se forem consideradas as saliências e reentrâncias do litoral. O litoral brasileiro abrange 18 das 42 regiões metropolitanas do país, abrigando 26% da população brasileira e inúmeros empreendimentos econômicos, responsáveis por 30% do PIB nacional (MMA, 2018). As áreas costeiras são de grande importância para as sociedades humanas pela capacidade de recursos naturais disponíveis, climas propícios ao estabelecimento de comunidades, lazer e atividades econômicas que podem ser desenvolvidas.

Os oceanos desempenham um papel crucial como reguladores climáticos do planeta, absorvendo e redistribuindo calor, carbono e umidade ao longo de vastas áreas. Eles armazenam cerca de 93% do calor adicional gerado pelo efeito estufa, ajudando a mitigar os impactos do aquecimento global. Além disso, os oceanos absorvem aproximadamente um terço do dióxido de carbono (CO₂) emitido pelas atividades humanas, o que reduz a concentração desse gás na atmosfera. Esse processo, embora essencial para a regulação climática, também leva à acidificação dos oceanos, afetando ecossistemas marinhos. Dessa forma, os oceanos são fundamentais para a estabilidade do clima global, influenciando padrões climáticos e sustentando a vida na Terra.

Dada a grande dimensão territorial, há de lembrar que a relação homem e natureza faz parte desse ecossistema, sobre o qual Diegues (2001, p. 79) enfatiza que os “seres vivos permanecem em equilíbrio, em homeostase com o ambiente, por meio de uma série de mecanismos que lhes permitem adaptar-se ao meio ambiente”. A relação sociedade humana e natureza costeira exige uma discussão sobre o uso e ocupação de solo. A preservação da beleza biótica desse ambiente inclui solo, água, fauna e flora, convivendo com pessoas (DIEGUES, 2001), pensamento corroborado por Thomas (1988) ao comentar que a expressão ‘civilização humana’ era símbolo vivo de conquista da natureza.

Assim, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de transição para uma economia de baixo carbono têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis que possam mitigar a emissão de gases de efeito estufa e, ao mesmo tempo, promover a produção de energia renovável. Entre essas soluções, o cultivo de microalgas vem se destacando como uma abordagem promissora, capaz de capturar dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e convertê-lo em biocombustíveis de alta eficiência (KARTHIKA; HARILAL, 2021).

As microalgas são organismos fotossintetizantes que possuem a capacidade de crescer rapidamente e fixar grandes quantidades de CO₂, transformando-o em biomassa rica em lipídios, carboidratos e proteínas. As quais podem ser convertidas em biocombustíveis, como biodiesel, bioetanol

e biogás, oferecendo uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis convencionais. Além disso, o cultivo de microalgas pode ser realizado em áreas não aráveis e com o uso de água salobra ou residual, o que reduz a competição com a agricultura tradicional e minimiza o consumo de recursos hídricos (RAZZAK *et al.*, 2022).

Para tal, as abordagens ambientais e de adequação à realidade climática vem se tornando cada vez mais expressivas no âmbito acadêmico e social. Na perspectiva dos grandes eventos e acordos mundiais, dentre eles a definição de estratégia de descarbonização da economia; avançar na implementação do mercado global de carbono; e mobilizar os países para o financiamento climático.

Nessa perspectiva, repensar alguns modos de produção tem sido cada vez mais urgente e inerente a uma realidade industrial e também social, uma vez que desde a década de 1980 que almejamos o apontado por Brundtland (1991) como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”, numa perspectiva de fato de um futuro comum, fortalecendo o tripé do desenvolvimento sustentável (econômico, social e ambiental).

Com o intuito de tornar prático e social, o investimento em soluções baseadas nos ecossistemas e na adaptação desses meios às necessidades sociais é uma das decisões mais inteligentes que a sociedade atual pode tomar diante dos eventos extremos que se tem visualizado. Tais soluções baseadas na natureza podem contribuir de forma holística para a redução do risco de desastres e colaborar com a criação de ferramentas de governanças e tomada de decisão no novo relacionamento entre as pessoas e o planeta, bem como urgentemente repensar uma transição energética menos poluidora para o mundo.

Com o fim, de atender o objetivo deste trabalho, que é investigar na literatura as tendências sobre o cultivo de microalgas e seu impacto na captura de CO₂, se faz necessário o mapeamento de referências bibliográficas sobre a temática. Sendo uma metodologia sistemática e abrangente, que avalia os referenciais teóricos sobre determinada temas previamente elencados como prioridade, em um dos principais bancos de produção científica, a plataforma *Scopus*. Assim, a análise bibliométrica possui uma função quantitativa para medir a produção e o impacto de publicações, identificando tendências, padrões de colaboração, trabalhos relevantes e lacunas na pesquisa sobre o tema. Bem como, conhecer na literatura quais são as cepas que melhor atendem a uma realidade de produção.

Com o intuito de melhorar a eficiência dos processos de produção de microalgas inter-relacionando a produção de biocombustíveis e captura de CO₂, identificar áreas de melhoria e tomar decisões informadas sobre a seleção de fontes de matéria-prima, métodos de cultivo, tecnologias de colheita e processamento, entre outros. Que vão desde a escolha das cepas (microalgas) que melhor se adequem ao processo e ambiente, as condições de cultivo e capacidade de captura de CO₂ (adaptabilidade), bem como uma aplicação energética como tecnologia para o desenvolvimento sustentável. Assim, têm se pensando cada vez mais na descarbonização, por meio da produção de microalgas e a captura de CO₂, como vital para combater as mudanças climáticas.

Metodologia

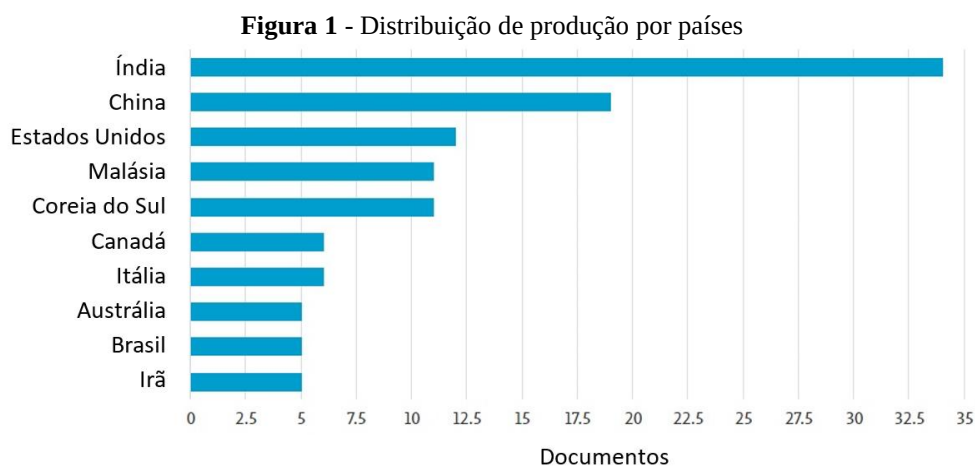
Para verificar o impacto do cultivo de microalgas na captura de CO₂, este trabalho realizou uma análise bibliométrica, com o objetivo de aprimorar a compreensão do panorama atual sobre o tema. Os dados foram obtidos na plataforma de busca *Scopus*, reconhecida como um dos maiores repositórios de documentos científicos. Um filtro preliminar foi aplicado para incluir apenas documentos do tipo "artigo", incorporando os termos “*renewable energy*” (energia renovável), “*microalgae*” (microalga),

“cultivation” (cultivo), “CO₂” e “biofuel” (biocombustível) em seus títulos, resumos ou palavras-chave, sem restrições temporais, resultando na identificação de 114 documentos.

Os documentos encontrados foram selecionados e analisados, gerando dados e ilustrações na plataforma *Scopus*. Essa análise incluiu o potencial das palavras-chave que melhor conectam as informações, os países com maior produção de publicações, os periódicos de maior destaque, e as frequências anuais de publicações. Além disso, metadados como detalhes de citação, informações bibliográficas, resumos, palavras-chave, financiamento e outros parâmetros relevantes foram coletados e exportados em formato CSV. Esses dados foram trabalhados com gráficos no *software VOSviewer* para a construção de mapas bibliométricos.

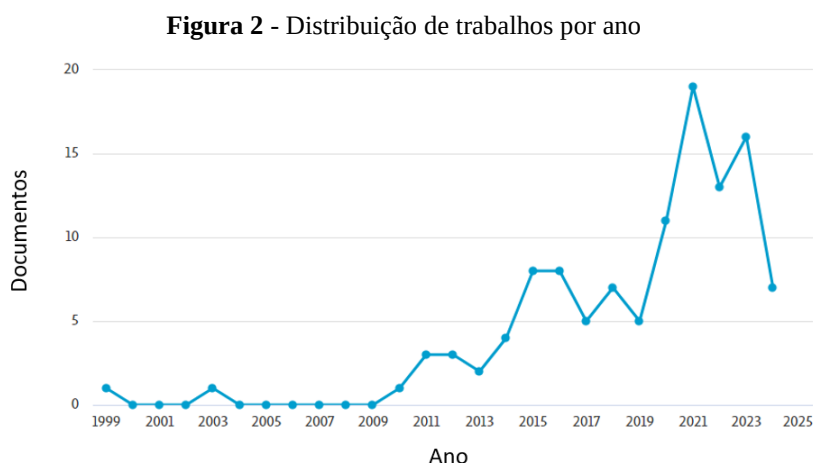
Resultados e Discussão

A seguir, alguns resultados encontrados após a análise bibliométrica. Podemos observar na Figura 1, a distribuição de trabalhos por países com maior contribuição, apesar de estar elencados os 10 mais significativos, a busca localizou um total de 40 países. Notadamente Índia e China, como grandes pesquisadores sobre a temática, porém os Estados Unidos, Malásia e Coreia do Sul ficam praticamente pareados nesse ranking.



Fonte: adaptado Scopus, 2024.

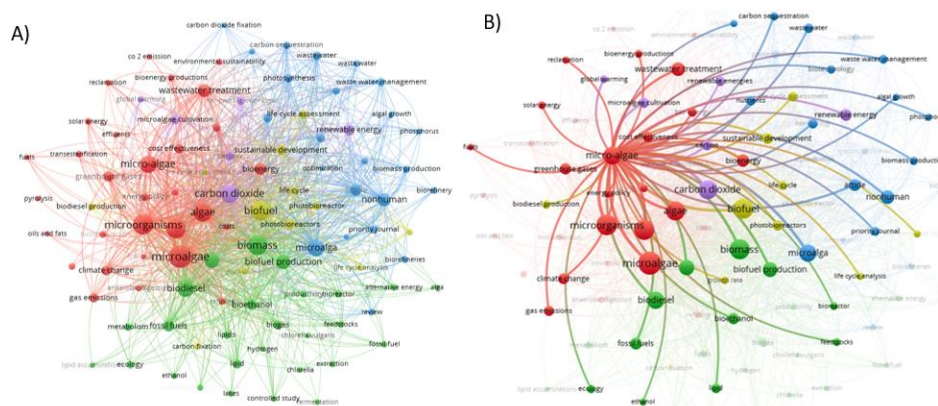
A Figura 2 apresenta o número crescente de artigos publicados por ano, entre o período de 1999 a 2025.



Fonte: adaptado Scopus, 2024.

Com o auxílio do *software VOSviewer*, podemos observar o gráfico de mapa bibliométrico, na Figura 3, que demonstra as palavras-chave que melhor se correlacionam com a busca sobre microalgas. O que nos leva a um direcionamento, inclusive de novas buscas e evolução da metodologia para aperfeiçoamento do trabalho, ou novas pesquisas integradas. Mas, o que é importante observar é o quanto nos encaminha para as questões climáticas em pauta, relacionadas a uma transição energética pensada e equitativa com o meio ambiente.

Figura 3 - Mapa bibliométrico de palavras-chave mais relevantes com a busca: A) geral e B) focando em microalga.



Fonte: adaptado de *VOSviewer*, com dados do Scopus, 2024.

Uma característica relevante e em comum sobre os três trabalhos mais citados, indicado pela Scopus, é que todos se tratam de revisão da literatura, o que justifica de certa forma sua grande busca. Haja vista, que é típico de novas pesquisas sobre temáticas em visibilidade. O primeiro é sobre microalgas para produção de biodiesel e outras aplicações (MATA *et al.*, 2010), que faz um apanhado sobre a temática, o qual possui 502 citações na *Scopus*. Já o segundo, 501 citações, aborda sobre captura integrada de CO₂, tratamento de águas residuais e produção de biocombustíveis por cultivo de microalgas (RAZZAK *et al.*, 2013) e por fim o terceiro com 445 citações, que já apontava a relação entre microalgas e biocombustíveis, como promissora a ideia para energia alternativa e renovável (SHUBA; KIFLE, 2018).

Assim, entendo que os organismos vegetais unicelulares ou multicelulares, sendo parte da base da cadeia alimentar, podem converter energia solar em matéria orgânica. Além de tamanhos variados, desde microscópicas até dezenas de metros, por isso as nomenclaturas de algas, macroalgas e microalgas (CETESB, 2023). Além das variações de seu tamanho, possui variação entre espécies de água doce, marinha e as que sobrevivem em ambos os ambientes, dentre as espécies, podemos destacar as com capacidade de biocaptura de CO₂, tais como: *Haematococcus pluvialis*, *Chlorella vulgaris* e *Arthrospira platensis* (IAMTHAM; SORNCHAI, 2022). Afinal, diariamente toneladas de CO₂ são liberados na baixa atmosfera, seja pela indústria ou mesmo as atividades urbanas cotidianas, então pensar nas capturas desses GEE e dar uma outra finalidade ou aplicação metodológica tem sido cada vez mais urgente (YANG *et al.*, 2023).

Então, se faz necessário considerar algumas variáveis importantes para a produção de microalgas, tais como: escolher espécies mais adaptativas e com alto teor de lipídio; taxa de crescimento, ou seja, que se reproduzam mais rapidamente; o poder de fixação de carbono, que pode facilitar a conversão eficiente do CO₂ em biomassa ou outros produtos desejados; tolerância a CO₂ elevado, que pode maximizar a capacidade de captura; cepas que tenham preferência por CO₂; observar os nutrientes,

bem como os fatores de estresse como temperatura, salinidade e pH; e o monitoramento constante a fim de acompanhar as etapas do processo.

Pensando na adaptabilidade das cepas, podemos já elencar algumas variáveis relevantes para as condições de cultivo, tais como: luz, pois a quantidade e qualidade da luz pode acelerar o crescimento das microalgas, assim como pode interferir as variações na intensidade luminosa; a temperatura da água, já que algumas espécies variam em suas preferências de temperatura; o pH da água que assim como luz e temperatura interferem em seu crescimento; a disponibilidade de nutrientes e de CO₂; a salinidade; a variação sazonal; e a resistência a estresses. Por fim, comparar com as referências na literatura a fim de avaliar o desempenho das microalgas escolhidas na execução do projeto.

Conclusões

O cultivo de microalgas surge como uma solução inovadora e promissora para a captura de dióxido de carbono (CO₂) e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, respondendo à urgente necessidade de combater as mudanças climáticas. A rápida taxa de crescimento das microalgas permite que várias colheitas sejam realizadas ao longo do ano, aumentando a produtividade e a viabilidade econômica do seu cultivo, além das diversas possibilidades de ambientes cultiváveis.

Em suma, o cultivo de microalgas apresenta uma abordagem viável e eficaz para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos, promovendo uma economia circular e sustentável. A integração dessa tecnologia em estratégias de desenvolvimento sustentável tem o potencial de acelerar a transição para uma economia de baixo carbono, contribuir para a conservação dos recursos naturais e mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas. Assim, o investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento no campo do cultivo de microalgas é crucial para desbloquear todo o seu potencial e maximizar os benefícios ambientais e econômicos que esta solução pode oferecer.

A análise bibliométrica do cultivo de microalgas como uma solução para a captura de CO₂ e a produção de biocombustíveis é essencial para entender o desenvolvimento científico e tecnológico dessa área. Essa abordagem permite mapear as principais tendências de pesquisa, identificar os países e instituições líderes, além de destacar os avanços e desafios que ainda precisam ser superados para que o cultivo de microalgas se torne uma solução viável em larga escala. Este estudo busca contribuir para o entendimento do estado da arte e das perspectivas futuras no campo do cultivo de microalgas, oferecendo *insights* valiosos para pesquisadores, formuladores de políticas e investidores interessados em tecnologias sustentáveis para mitigação das mudanças climáticas e produção de energia renovável.

Onde podemos elencar algumas soluções para o futuro, energeticamente, como: contribuindo significativa para a redução das emissões de CO₂ na atmosfera, sendo aliado ao combate às mudanças climáticas; o uso sustentável de recursos, demonstrando a viabilidade de utilizar microalgas como uma fonte sustentável de matérias-primas para diversos setores, reduzindo a pressão sobre recursos naturais finitos; repensar a matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis, diversificando as fontes de energia; incentivo à pesquisa e inovação, com estímulo ao desenvolvimento de tecnologias relacionadas às microalgas e à captura de CO₂. Os quais todos corroboram para uma transição energética, pensando nas gerações futuras.

Agradecimentos

A pesquisa foi apoiada pela Galp, Conselho Nacional Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPQ) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Os autores agradecem ao Labtam, Labec, EAJ e UFRN por todo o apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

BRUNDTLAND, G. H. et al. **Nosso futuro comum**. Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CETESB. **Florações de Microalgas Marinhas**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/praias/floracoes-de-microalgas-marinhas/>. Acesso em: 30 out 2023.

DIEGUES, A. C. S. **O Mito Moderno da Natureza Intocada**. São Paulo: HUCITEC, 2001.

IAMTHAM, S.; SORNCHAI, P. Biofixation of CO₂ from a power plant through large-scale cultivation of *Spirulina maxima*. **South African Journal of Botany**, v. 147, 840-851 p. 2022.

KARTHIKA, S. M.; HARILAL, C. C. Chapter 23: feasibility studies on the sequestration of atmospheric carbon dioxide using selected microalgal members. **Biodivers. Conserv. & Ecol. Restor.** 1(1), 2021.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, 217-232 p. 2010.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Características e limites da Zona Costeira e Espaço Marinho**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/a-zona-costeira-e-seus-multiplos-usos/caracteristicas-da-zona-costeira>. Acesso em: 20 mai. 2018.

RAZZAK, S. A.; HOSSAIN, M. M.; LUCKY, R. A.; BASSI, A. S.; DE LASA, H. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, 622-653 p. 2013.

RAZZAK, S. A.; LUCKY, R. A.; HOSSAIN, M. M.; DELASA, H. Valorization of Microalgae Biomass to Biofuel Production: A review. *Energy Nexus*. **Elsevier**, 7, p. 100139, 2022.

SHUBA, E. S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: 'Promising' alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, 746-755 p. 2018.

THOMAS, K. O predomínio humano. In: **O Homem e o Mundo Natural: mudanças de atitude em relação às plantas e aos animais (1500-1800)**. São Paulo: Cia Das Letras, 1988.

YANG, P.; CHEN, B.; DENG, K.; LIAO, L.; LI, Y.; LIN, G.; GUO, J. Microalgae from the Three Gorges Reservoir for Carbon Dioxide Fixation and Biodiesel Production. **BioEnergy Research**, v. 16, 2450–2464 p. 2023.