



Estudo do uso de microalgas na agricultura com ênfase em biofertilizantes

Bruno Luiz de Souza Ferreira

Flávio André Prata Ferreira

Projeto de Final de Curso

Orientadoras

Yordanka Reyes Cruz, D. Sc.

Carolina Vieira Viêgas, D.Sc.

Janeiro de 2023.

Estudo do uso de microalgas na agricultura com ênfase em biofertilizantes

Bruno Luiz de Souza Ferreira

Flávio André Prata Ferreira

Projeto Final de Curso submetido ao corpo docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico (Flávio Ferreira) e Químico Industrial (Bruno Ferreira).

Aprovado por:

Carla Reis de Araújo, D. Sc

Gisel Chenard Díaz, D. Sc

Orientado por:

Carolina Vieira Viêgas, D. Sc

Yordanka Reyes Cruz, D. Sc..

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Janeiro de 2023

Ficha Catalográfica

F383e Ferreira, Bruno Luiz de Souza
 Estudo do uso de microalgas na agricultura com
 ênfase em biofertilizantes / Bruno Luiz de Souza
 Ferreira. -- Rio de Janeiro, 2023.
 90 f.

 Orientadora: Yordanka Reyes Cruz.
 Coorientadora: Carolina Vieira Viêgas.
 Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
 Química, Bacharel em Química Industrial, 2023.

 1. Biofertilizantes. 2. microalgas. 3.
 agricultura. 4. bioeconomia. I. Cruz, Yordanka
 Reyes, orient. II. Viêgas, Carolina Vieira,
 coorient. III. Título.

Dedicamos esse trabalho a todos os nossos familiares
e amigos que nos apoiaram e incentivaram durante
todo esse longo percurso.

AGRADECIMENTOS

As nossas orientadoras, Yordanka Reyes e Carolina Viêgas, por todos os ensinamentos, pelo apoio, e principalmente, por toda disposição e paciência em nos orientar.

Aos membros da banca, por toda disponibilidade em avaliar este projeto de conclusão de curso.

Eu, Flávio, agradeço aos meus pais Maria da Conceição e Aldízio, a minha esposa Taís Martins, e as minhas enteadas, Livia, Eduarda e Sarah Helena. Agradeço às minhas irmãs Teresa, Cláudia, Paula e ao meu sobrinho Pedro. Agradeço às amigas Carolina Mello e Marina Pinheiro.

Eu, Bruno, agradeço à minha mãe Teresa Cristina, pois sem ela eu não teria a vida. Agradecer a aquelas que já se foram, minha amada vovó Glorinha e a minha tia Lourdes, que me cuidaram quando menino e me tornaram um homem. Agradecer às minhas tias Carmem, Leida e Nice, não por dividirem o mesmo sangue que eu, mas sim o coração. Nem todo irmão é um amigo, mas todo amigo é um irmão, aos melhores irmãos que a vida poderia me dar, Ricardo, Guilherme, Paulo e Thalita eu lhes agradeço. A todos que me ajudaram a chegar até aqui eu também agradeço



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA
ESCOLA DE QUÍMICA**



Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Químico Industrial (Bruno Ferreira).e Engenheiro Químico (Flávio Ferreira).

Estudo do uso de microalgas na agricultura com ênfase em biofertilizantes

Bruno Luiz de Souza Ferreira

Flávio André Prata Ferreira

Janeiro, 2023

Orientadores: Yordanka Reyes Cruz, D. Sc.
Carolina Vieira Viêgas, D.Sc.

A demanda internacional por alimentos intensificou a prática agrícola com efeitos econômicos, sociais e ambientais. Para se aumentar a produção de alimentos na agricultura, o uso de fertilizantes é indispensável, porque o plantio constante sem o tempo necessário para que o solo recupere os seus nutrientes afeta na sua fertilidade e capacidade de cultivo. Mas a obtenção e uso de fertilizantes tem vários impactos negativos, as principais fontes de fertilizantes são finitas e sua produção tem grande emissão de poluentes, assim como a rápida disseminação de nutrientes pelo solo por parte de certos fertilizantes pode promover a eutrofização, ecotoxicidade e outras formas de poluição dos solos, mares e águas. Os biofertilizantes mudam essa dinâmica, provenientes de fontes renováveis, produzidos muitas vezes a partir de resíduos, faz com que tenham menor impacto ambiental e tragam benefícios financeiros pelo melhor uso de sua biomassa, mas os de origem de microalgas tem uma série de vantagens. As condições de cultivo das microalgas permitem que elas não concorram contra a produção de alimentos, a sua capacidade de gerar vários bioprodutos concomitante e a possibilidade de crescer enquanto tratam de efluentes, configuram vantagens para o seu uso como biofertilizante e produto da bioeconomia circular. O estudo buscou identificar a realidade atual das

microalgas neste setor, assim como as pesquisas e tecnologias sendo desenvolvidas para tanto, isto foi feito através da consulta de patentes e artigos científicos sobre o tema. Com a análise dos artigos e patentes evidenciou-se os benefícios ambientais e o melhor desenvolvimento das plantas com biofertilizantes a partir de microalgas, mas a produção única e exclusivamente de biofertilizantes a partir delas não tem viabilidade econômica, mas por meio de biorrefinarias e a produção simultânea de outros bioprodutos os ganhos financeiros justificam a sua produção. Através de biorrefinarias é possível tanto gerar vários bioprodutos de alto valor agregado, assim como tratar efluentes, diminuindo os seus custos de tratamento e provendo nutrientes e água para o cultivo de microalgas. Estudos foram e continuam sendo desenvolvidas tanto no Brasil quanto no mundo, mas o baixo número de patentes produzidas e o potencial de ganho econômico e ambiental justifica o investimento na área. A agricultura, fertilização do solo e microalgas estão diretamente conectadas sob os conceitos da bioeconomia e o presente trabalho busca identificar e propor o melhor caminho para essa conexão.

Palavras-chave: biofertilizante, microalga, bioestimulante, bioeconomia.

ABSTRACT

STUDY OF THE USAGE OF MICROALGAE IN AGRICULTURE WITH EMPHASIS ON BIOFERTILIZERS

The international demand for food has intensified agricultural practices with economic, social and environmental effects. In order to increase food production in agriculture, the use of fertilizers is indispensable, because constant planting without the necessary time for the soil to recover its nutrients affects its fertility and cultivation capacity. But obtaining and using fertilizers has several negative impacts, the main sources of fertilizers are finite and their production has a large emission of pollutants, as well as the rapid dissemination of nutrients through the soil by certain fertilizers can promote eutrophication, ecotoxicity and other forms of soil, sea and water pollution. Biofertilizers change this dynamic, coming from renewable sources, often produced from waste, make them have a lower environmental impact and bring financial benefits for the better use of their biomass, but those of microalgae origin have a number of advantages. The cultivation conditions of microalgae allow them to not compete against food production, their ability to generate several bioproducts concurrently and the possibility of growing while treating effluents, set up advantages for their use as a biofertilizer and a product of the circular bioeconomy. The study sought to identify the current reality of microalgae in this sector as well as the researches and technologies being developed for this purpose, this was done through the consultation of patents and scientific articles on the subject. With the analysis of articles and patents, the environmental benefits and the better development of plants with biofertilizers from microalgae were evidenced, but the production solely and exclusively of biofertilizers from them is not economically viable, but through biorefineries and the simultaneous production use of other bioproducts the financial gains justify its production. Through biorefineries it is possible both to generate various bioproducts with high added value, as well as to treat effluents, reducing their treatment costs and providing nutrients and water for the cultivation of microalgae. Studies have been and continue to be developed both in Brazil and in the world, but the low number of patents produced and the potential for economic and environmental gains justifies the investment in the area. Agriculture, soil fertilization and microalgae are directly connected under the concepts of bioeconomy and the present work seeks to identify and propose the best way to promote it.

Keywords: biofertilizer, microalgae, biostimulant, bioeconomy

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Justificativa | 1 |
| 1.2. Estrutura do Trabalho | 1 |
| 1.3. Objetivos | 2 |
| 1.3.1. Objetivo Geral | 2 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 2 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 3 |
| 2.1. Agricultura | 3 |
| 2.1.1. Produção agrícola no Brasil | 3 |
| 2.1.1.1. Evolução da produção agrícola no Brasil | 3 |
| 2.1.1.2. Produção nacional em toneladas | 4 |
| 2.1.1.3. Exportações em dólares | 9 |
| 2.1.1.4. Impacto no PIB | 12 |
| 2.1.1.5. Áreas agricultáveis | 13 |
| 2.2. Fertilizantes | 16 |
| 2.2.1. Definição de fertilizantes | 17 |
| 2.2.2. Macro e micronutrientes | 17 |
| 2.2.2.1. Nitrogênio | 17 |
| 2.2.2.2. Fósforo | 18 |
| 2.2.2.3. Potássio | 18 |
| 2.2.2.4. Enxofre | 19 |
| 2.2.3. Tipos | 19 |
| 2.2.3.1. Mineral | 19 |
| 2.2.3.2. Sintético/Químico | 19 |
| 2.2.3.3. Orgânico/Biofertilizante | 19 |
| 2.2.3.4. Bioestimulantes | 20 |
| 2.2.4. Tipos de biofertilizante | 21 |
| 2.2.4.1. Origem animal | 21 |
| 2.2.4.2. Origem vegetal | 21 |
| 2.2.4.3. Digestão anaeróbia | 22 |
| 2.2.4.4. Microalgas | 22 |
| 2.2.5. Técnicas de aplicação | 23 |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.2.5.1. | Fertirrigação | 23 |
| 2.2.5.2. | Spray foliar | 24 |
| 2.2.5.3. | Pré-tratamento das sementes | 24 |
| 2.2.5.4. | Hidroponia | 25 |
| 2.2.5.5. | Fertilização sólida | 25 |
| 2.2.6. | Produção e demanda de fertilizantes no Brasil | 25 |
| 2.3. | Microalgas | 26 |
| 2.3.1. | Definição | 26 |
| 2.3.2. | Composição | 27 |
| 2.3.3. | Biorrefinaria e bioprodutos | 27 |
| 2.3.3.1. | Bioenergia e biocombustíveis | 29 |
| 2.3.3.2. | Nutracêuticos | 31 |
| 2.3.4. | Biorremediação | 32 |
| 2.3.4.1. | Captação de CO ₂ | 34 |
| 2.3.4.2. | Efluentes | 35 |
| 2.3.4.2.1. | Urbanos | 35 |
| 2.3.4.2.2. | Industriais | 35 |
| 2.3.4.2.3. | Agrícolas | 37 |
| 2.3.4.2.4. | Pecuária | 37 |
| 2.3.4.2.5. | Metais pesados | 38 |
| 2.3.4.2.6. | Digestão e codigestão anaeróbia | 38 |
| 2.4. | Estudos ambientais | 39 |
| 2.4.1. | Bioeconomia | 39 |
| 2.4.2. | Economia Circular | 41 |
| 2.4.3. | Análise de Ciclo de Vida (ACV) | 41 |
| 3. | Metodologia para o estudo | 42 |
| 3.1.1. | Mapeamento de artigos | 42 |
| 3.1.1.1. | Diretório dos grupos de pesquisa no Brasil – CNPq | 42 |
| 3.1.1.2. | Base do Science Direct | 44 |
| 3.1.2. | Mapeamento de Patentes | 44 |
| 3.1.2.1. | Base de busca de patentes | 44 |
| 4. | Resultados e discussão | 45 |
| 4.1. | Resultados da busca de artigos no Diretório dos grupos de pesquisa no Brasil - CNPq | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2. Resultados da busca por artigos na base do Science Direct | 48 |
| 4.3. Resultado da busca por patentes | 59 |
| 4.4. Conclusão | 61 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |
| APÊNDICE | 66 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ABA | Ácido abscísico |
| ACV | Avaliação de Ciclo de Vida |
| AGROSTA | Estatísticas de comércio exterior do agronegócio brasileiro |
| BR | Brassinosteroides |
| CEPEA | Centro de estudos avançados em economia aplicada |
| CK | Citocininas |
| CNAE | Classificação nacional de atividades econômicas |
| DBO | Demanda biológica de oxigênio |
| DF | Distrito Federal |
| DQO | Demanda química de oxigênio |
| ETH | Etileno |
| GA3 | Ácido giberélico |
| GAs | Giberelinas |
| GEE | Gases do efeito estufa |
| IBGE | Instituto brasileiro de geografia e estatística |
| JA | Jasmonato |
| MAPA | Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento |
| MLD | Milhões de litros por dia |
| PIB | Produto interno bruto |
| PPCPs | Produtos farmacêuticos e de higiene pessoal |
| PTF | Produtividade total de fatores |
| RSU | Resíduos sólidos urbanos |
| SA | Salicilato |
| SL | Estrigolactonas |
| UE | União Europeia |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Índices de PTF | 4 |
| Figura 2 – Produção soja | 5 |
| Figura 3 – Mapa produção soja | 5 |
| Figura 4 – Produção milho | 6 |
| Figura 5 – Mapa produção milho | 6 |
| Figura 6 – Produção cana-de-açúcar | 7 |
| Figura 7 – Mapa produção cana-de-açúcar | 7 |
| Figura 8 – Produção café | 8 |
| Figura 9 – Mapa produção café | 8 |
| Figura 10 – Exportações brasileiras do agronegócio por mercados – 2022 | 9 |
| Figura 11 – Exportações brasileiras do agronegócio por UF – 2022 | 10 |
| Figura 12 – Exportações brasileiras do agronegócio por setores – 2022 | 10 |
| Figura 13 – Balança comercial do agronegócio – série histórica | 11 |
| Figura 14 – Exportações brasileiras do agronegócio por mês – últimos 5 anos | 12 |
| Figura 15 – Percentual das áreas cultivadas | 14 |
| Figura 16 – Uso da terra Brasil | 15 |
| Figura 17 – Uso da terra Estados Unidos | 15 |
| Figura 18 – Matopiba | 16 |
| Figura 19 – Produção/importação de fertilizantes no Brasil | 26 |
| Figura 20 – Publicação de patentes por ano | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Palavras-chaves utilizadas na busca de linhas de pesquisa do diretório do CNPq | 43 |
| Tabela 2: Palavras-chaves utilizadas na busca de artigos utilizando a base de dados do Science Direct | 44 |
| Tabela 3: Grupos de pesquisa do diretório do CNPq | 46 |
| Tabela 4: Tópicos abordados no artigos da base do Science Direct | 48 |
| Tabela 5: Tópicos abordados no artigos da base do Science Direct | 49 |
| Tabela 6: Subtópicos de Biorremediação | 52 |
| Tabela 7: Subtópicos de Biorrefinaria e bioprodutos | 53 |
| Tabela 8: Subtópicos de Condições de plantio | 54 |
| Tabela 9: Subtópicos de Técnicas de aplicação | 55 |
| Tabela 10: Subtópicos de Estudo ambiental | 55 |
| Tabela 11: Microalgas estudadas nos artigos | 56 |
| Tabela 12: Tipos de artigo na base do Science Direct | 57 |
| Tabela 13: Aplicações de patentes por país na base de patentes Espacenet | 60 |

1. Introdução

1.1. Justificativa

A crescente demanda por alimentos e a incapacidade de provê-los em todo o mundo leva a problemas em todo o globo. A prática constante da agricultura, principalmente da monocultura, faz com que os nutrientes necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas no solo diminuam e para sanar tal problema o uso de fertilizantes é necessário. Para a produção de fertilizantes minerais e sintéticos é preciso que componentes que são finitos sejam extraídos da natureza e processados para a produção dos fertilizantes levando a impactos econômicos, sociais e ambientais negativos. A contaminação de do solo, fontes d'água e o ar, a manipulação da oferta de insumos essenciais para a agricultura levando a crises no mercado, e por fim conflitos armados pelo controle de áreas para a obtenção de recursos não renováveis como o petróleo e minerais para a produção de entre várias coisas, combustíveis e fertilizantes, faz com que novas rotas de produção sejam criadas.

Logo por meio de fontes renováveis é possível atenuar e gradualmente sanar tais problemas, pois com a matéria orgânica é possível produzir biofertilizantes e vários outros produtos de alto valor agregado. Dentre as fontes orgânicas as microalgas tem grande diversidade e capacidade de ser produzidas em diversas condições, a possibilidade do seu cultivo em efluentes configura um importante ganho econômico e ambiental por não precisar de outros insumos como nos tratamentos físicos e químicos e simultaneamente tratar os efluentes em questão.

Portanto a justificativa deste trabalho é a demanda crescente por fertilizantes no mundo inteiro em decorrência do aumento do consumo de alimentos. Com isto, novas rotas de produção de fertilizantes são necessárias. Este trabalho aborda o uso de microalgas como insumo para fabricação de fertilizantes.

1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho será estruturado em 6 capítulos, os quais estão descritos a seguir:

CAPÍTULO I – Introdução ao tema proposto, estrutura do trabalho e objetivos;

CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica com os conceitos básicos para a compreensão do tema deste projeto final. Abordagem de conceitos sobre agricultura, fertilizantes, microalgas e estudo ambiental que são essenciais para o entendimento da área de estudo realizada;

CAPÍTULO III – Metodologia: Descreve a metodologia utilizada para o estudo de prospecção tecnológica, que visa a consulta de artigos, patentes e projetos que cite práticas e tecnologias relacionada ao uso de microalgas na agricultura como biofertilizantes;

CAPÍTULO IV – Resultados e discussões: são apresentados os resultados das buscas realizadas na prospecção tecnológica e suas interpretações, também expressas por gráficos e tabelas.

CAPÍTULO V – Conclusões: considerações finais da busca bibliográfica da prospecção.

CAPÍTULO VI – Referências Bibliográficas: Lista das fontes literárias e virtuais utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho interrelaciona 3 campos de estudo, agricultura que fornece alimentos para a população, os fertilizantes que permitem uma melhor produção agrária e as microalgas, que podem beneficiar tanto as etapas iniciais quanto finais do cultivo de plantas. Por meio da identificação das rotas tecnológicas, atuais e/ou em desenvolvimento, vamos debruçar sobre o potencial da realidade atual e potenciais futuros na aplicação de microalgas dentro da agricultura.

1.3.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se os seguintes:

1. Buscar artigos e patentes que identifiquem as principais formas de se usar as microalgas na agricultura

2. Analisar o panorama nacional e internacional de pesquisas referentes às microalgas a fim de se aumentar a sua produção e suprir demandas dentro e fora da agricultura;
3. Analisar a evolução do cenário patentário nacional e internacional em relação aos biofertilizantes de microalgas;
4. Pesquisar sobre estratégias que conectam a agricultura, fertilizantes e microalgas sob os conceitos da bioeconomia para maximizar as suas aplicações e obter o melhor retorno econômico-ambiental.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Agricultura

2.1.1 Produção agrícola no Brasil

A produção agropecuária brasileira sempre foi destaque na economia do país. Desde os tempos do Brasil colônia, a atividade agropecuária alavancou a economia em todos os aspectos. A atualização tecnológica tem sido determinante no Brasil e no mundo para garantir o abastecimento de alimentos (Gasques, 2022).

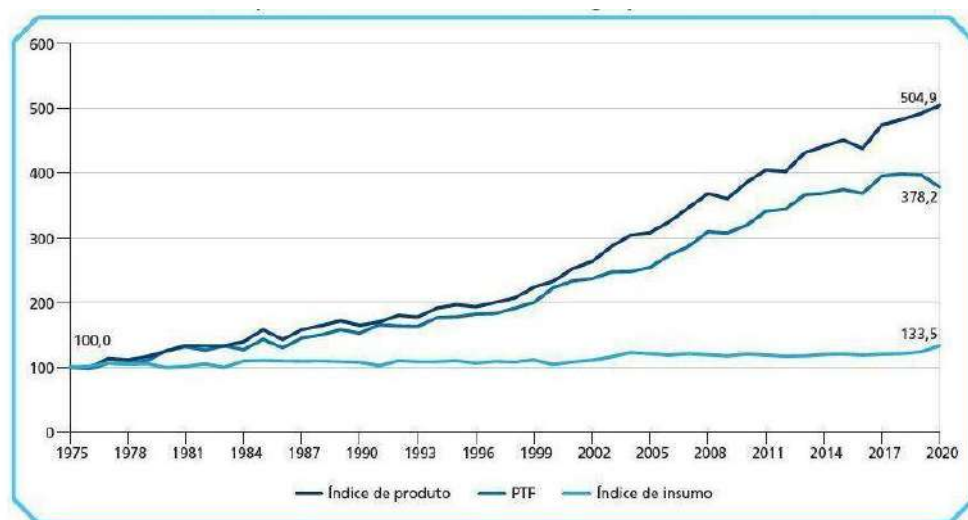
2.1.1.1 Evolução da produção agrícola no Brasil

A eficiência de uma economia, para produzir bens e serviços com os seus recursos disponíveis, é medida pela produtividade (Penha, 2014). Esta medida varia conforme aquilo que for considerado recurso. Uma medida bastante utilizada é a Produtividade Total de Fatores (PTF), pois leva em conta a contribuição de todos os fatores, a PTF mede a relação entre o produto total e o insumo total.

O crescimento ininterrupto do setor agropecuário brasileiro desde a década de 1970 está baseado em tecnologia. A organização institucional do sistema de inovação e pesquisa nos anos 1970 foi fundamental para alcançar este patamar tecnológico. As transformações macroeconômicas e a estabilização monetária alcançadas em meados dos anos 1990, também vieram permitir o estímulo da produção e aumento da competitividade no setor agropecuário.

Conforme mostrado na figura 1, a produção da agropecuária no Brasil cresceu de 100,0 para 504,9, ao passo que a PTF passou de 100,0 para 378,2. Neste mesmo período, o aumento de insumos cresceu de 100,0 para 133,5 apenas (Gasques, 2022). Ou seja, o crescimento da agropecuária brasileira não foi apenas em produção, mas também, e muito, em produtividade.

Figura 1: Índices de PTF, de produto e de insumo no setor agropecuário - Brasil (1975-2020)



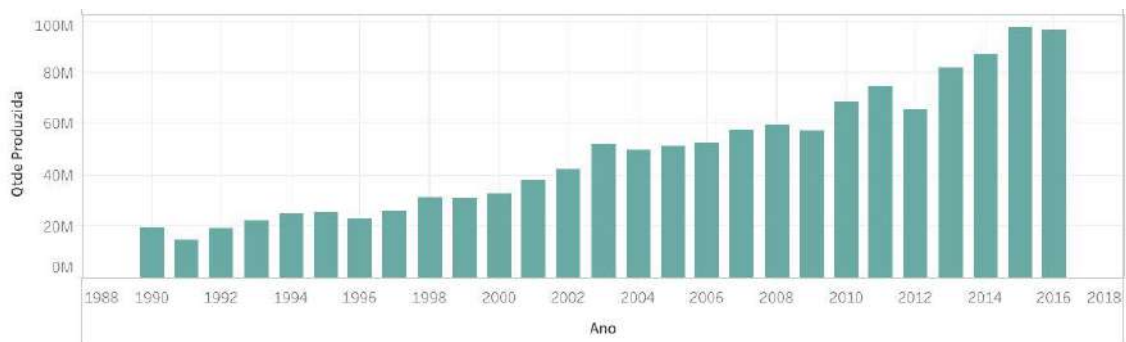
Fonte: IPEA

2.1.1.2 Produção nacional em toneladas

As principais culturas da agricultura brasileira são, nessa ordem, soja, milho, cana-de-açúcar e café. A soja tem origem asiática, em cultivos de clima temperado, foi introduzida no Brasil no início do século XX. Graças a instituições como IAC e Embrapa, existem hoje no país muitas variedades de soja adaptadas às condições específicas de latitude, clima e solo das diferentes regiões brasileiras. Com recordes de produtividade em todas as regiões em que é cultivada, a soja ocupa um terço da área agrícola total. Cerca de 40% da soja produzida no país é exportada, o restante é consumido e processado no país. O consumo de soja pela população é feito muitas vezes de maneira indireta, quando ela é utilizada para alimentação de animais que irão gerar produtos de grande consumo, como por exemplo queijo, leite, aves, suínos e bovinos. A soja está na origem de grandes projetos de integração logística entre as regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste. Além disso, gera 1,5 milhão de empregos diretos. As figuras a seguir foram consultadas na

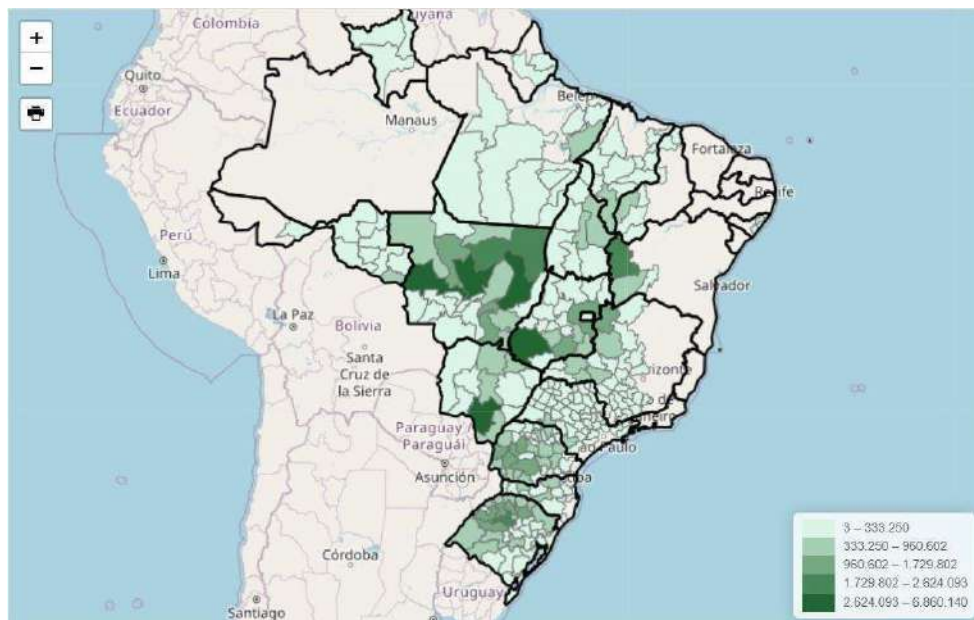
página virtual do Sistema de Inteligência Territorial da Macrologística Agropecuária Brasileira da Embrapa, e dão um panorama das principais culturas cultivadas no Brasil. Os dados sobre estas culturas também foram consultados nesta página virtual. A figura 2 mostra a evolução da produção de soja, principalmente de 2010 para cá. A figura 3 mostra a grande produção do estado de Mato Grosso e Goiás, bem como a presença da soja em todo cerrado.

Figura 2: Produção nacional de soja em toneladas



Fonte: Embrapa

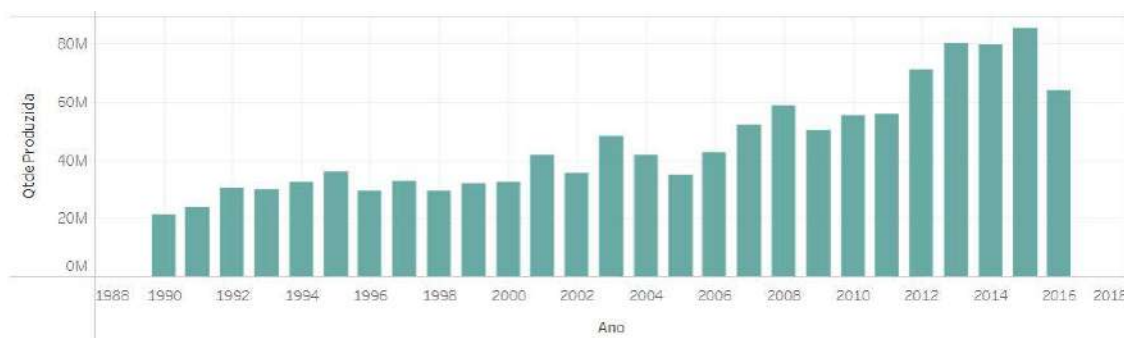
Figura 3: Mapa da repartição territorial da produção de soja (em toneladas)



Fonte: Embrapa

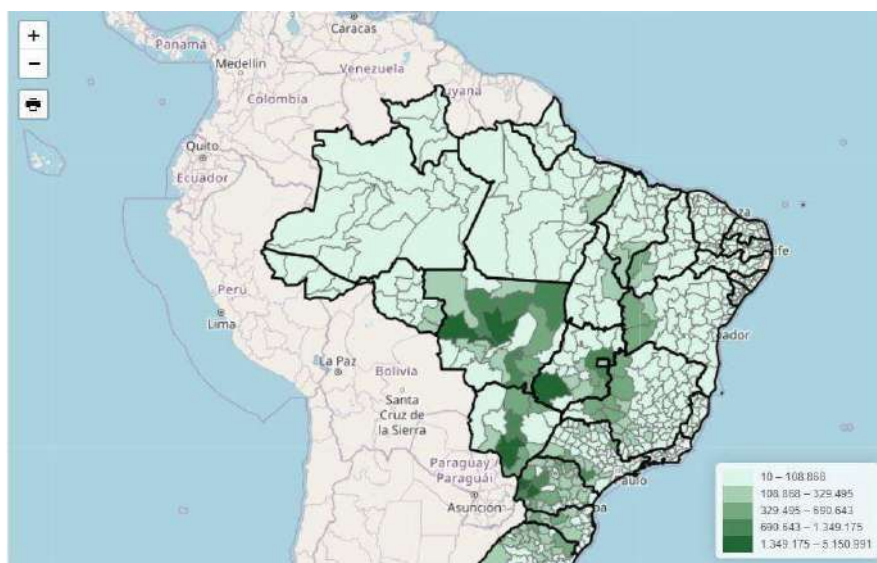
O milho é uma planta originária das Américas cultivado e consumido em todo o mundo, em produção mundial, só perde para o trigo e o arroz. Menos de 10% do total produzido no Brasil é utilizado no consumo direto para alimentação humana, mais de 75% são utilizados na alimentação animal e 15% é utilizado pela indústria alimentícia e na produção de espessantes, colantes e óleos. Hoje em dia, a maior parte do milho cultivado no Brasil é geneticamente modificado, reduzindo o uso de defensivos agrícolas e com alta produtividade. A figura 4 mostra a evolução da quantidade produzida, principalmente dos anos 2000 para cá. Na figura 5, a área onde ocorrem as maiores colheitas de milho são também onde ocorrem as de soja.

Figura 4: Produção nacional de milho em toneladas



Fonte: Embrapa

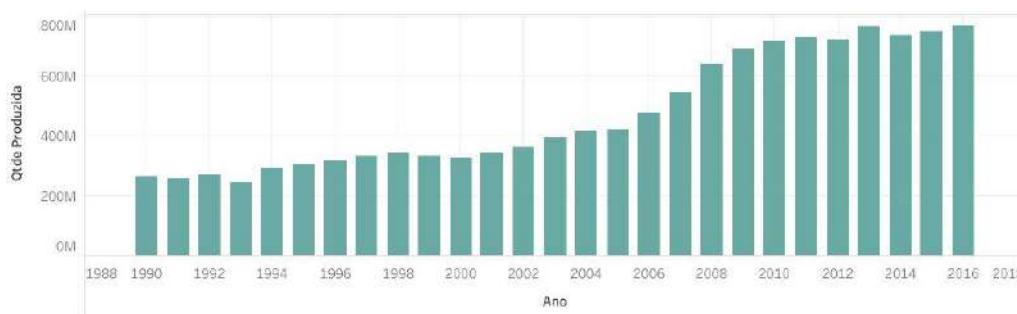
Figura 5: Mapa da repartição territorial da produção de milho (em toneladas)



Fonte: Embrapa

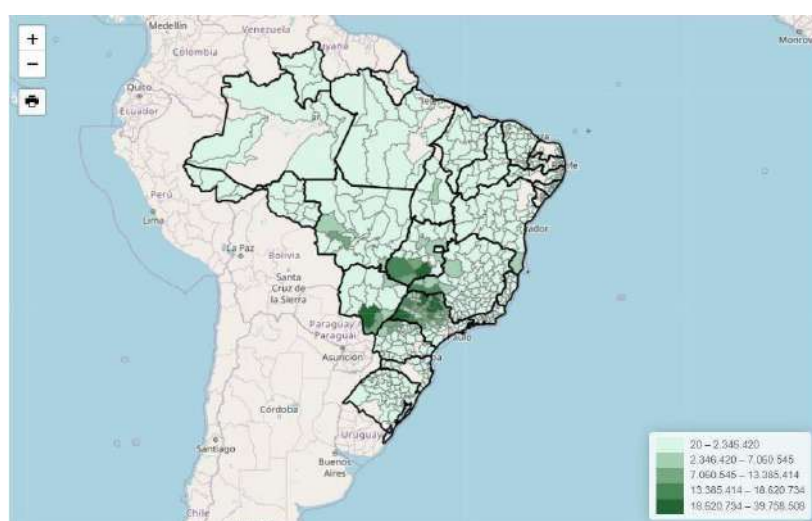
A cana-de-açúcar é uma cultura que esteve presente no país desde a época do Brasil colônia. Mantém o país como maior produtor e exportador de açúcar do mundo, além de produzir etanol e gerar energia elétrica com o bagaço. Os preços internacionais ditam a proporção etanol/açúcar produzida todos os anos. A maior parte do açúcar produzido no mundo vem da cana-de-açúcar (cerca de 85%), o restante vem da beterraba. Tanto açúcar quanto etanol são intensivos em mão de obra e capital, os maiores consumidores de açúcar são também os maiores produtores: Brasil, Índia, China, Tailândia, Paquistão, México e Colômbia. Conforme a figura 6, as colheitas de cana-de-açúcar a partir dos anos 2000 praticamente triplicam em relação aos anos 1990. Na figura 7 é possível perceber que a cana-de-açúcar é plantada em praticamente todo território nacional.

Figura 6: Produção nacional de cana-de-açúcar em toneladas



Fonte: Embrapa

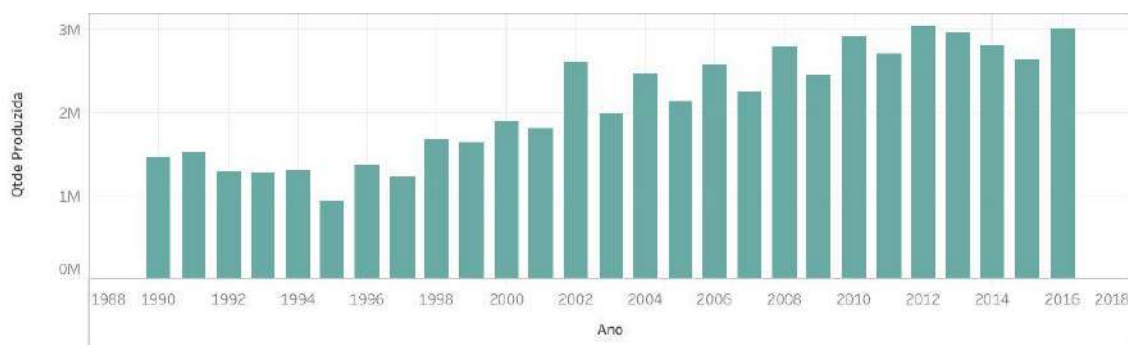
Figura 7: Mapa da repartição territorial da produção de cana-de-açúcar (em toneladas)



Fonte: Embrapa

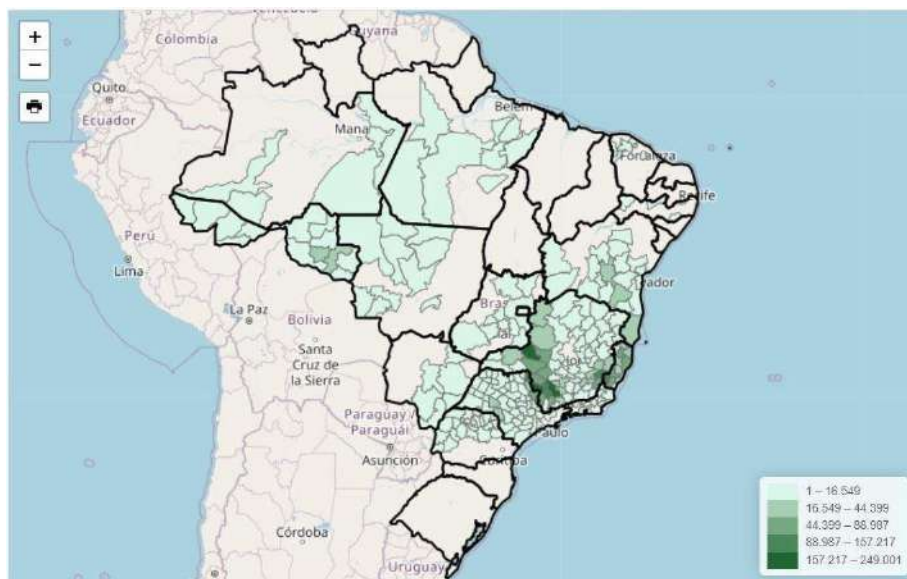
A agricultura brasileira foi sinônimo de café nos séculos XIX e XX, grande financiadora da urbanização e da industrialização. A demanda mundial sempre crescente foi acompanhada pela produção brasileira. O Brasil é visto como produtor de grandes quantidades, enquanto países como Colômbia, Costa Rica e Guatemala recebem valores adicionais em sua produção pela qualidade. A figura 8 mostra que, tal qual as outras principais culturas, o café também tem um salto em sua produção a partir dos anos 2000. A principal área de cultivo do café é a mata atlântica e parte do cerrado mineiro, conforme a figura 9.

Figura 8: Produção nacional de café em toneladas



Fonte: Embrapa

Figura 9: Mapa da repartição territorial da produção de café (em toneladas)

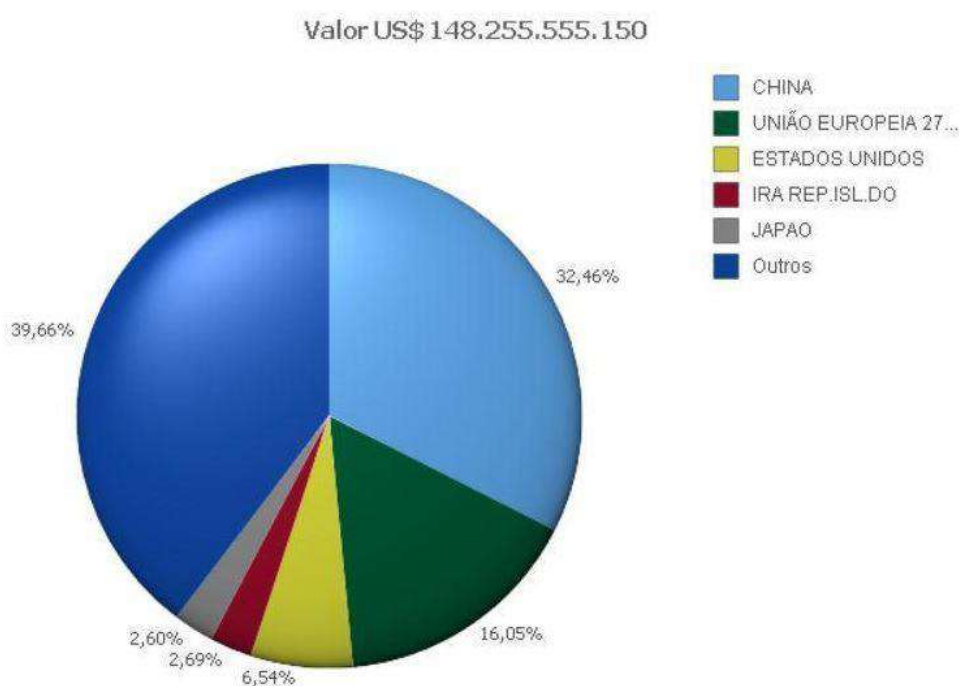


Fonte: Embrapa

2.1.1.3 Exportações em dólares

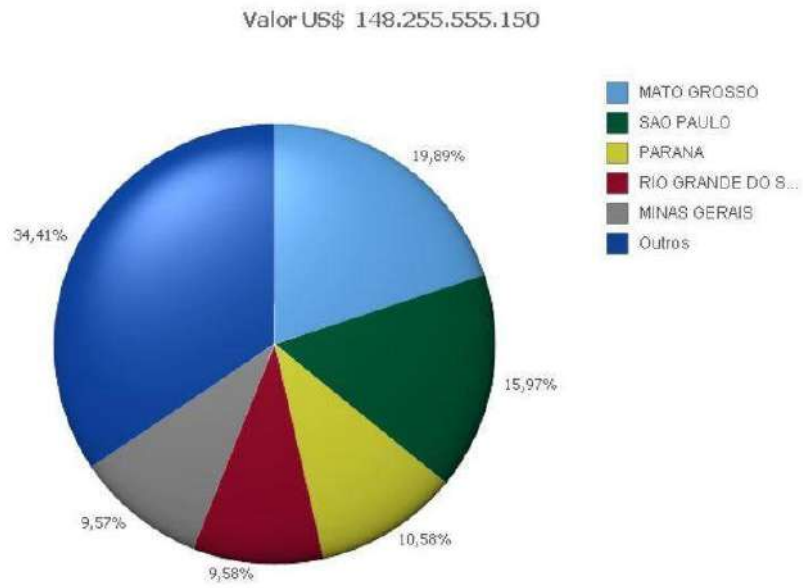
Os gráficos a seguir foram consultados na página virtual do AGROSTAT (Estatísticas de Comércio Exterior de Agronegócio Brasileiro – MAPA) mostram aspectos das exportações do agronegócio brasileiro. São gráficos relativos ao ano de 2022, com informações até o mês de novembro. A China é hoje o maior comprador de produtos agropecuários brasileiros, como destino de quase um terço das exportações brasileiras, como é possível ver pela figura 10. A figura 11 mostra que os principais estados exportadores são nessa ordem Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Minas Gérias. Todos eles têm forte presença das quatro principais culturas apresentadas anteriormente. A figura 12 traz as principais exportações do agronegócio brasileiro, a soja é de longe o principal produto de exportação da agropecuária brasileira, respondendo sozinha por mais de um terço das exportações agropecuárias brasileiras.

Figura 10: Exportações brasileiras do agronegócio por mercados em 2022



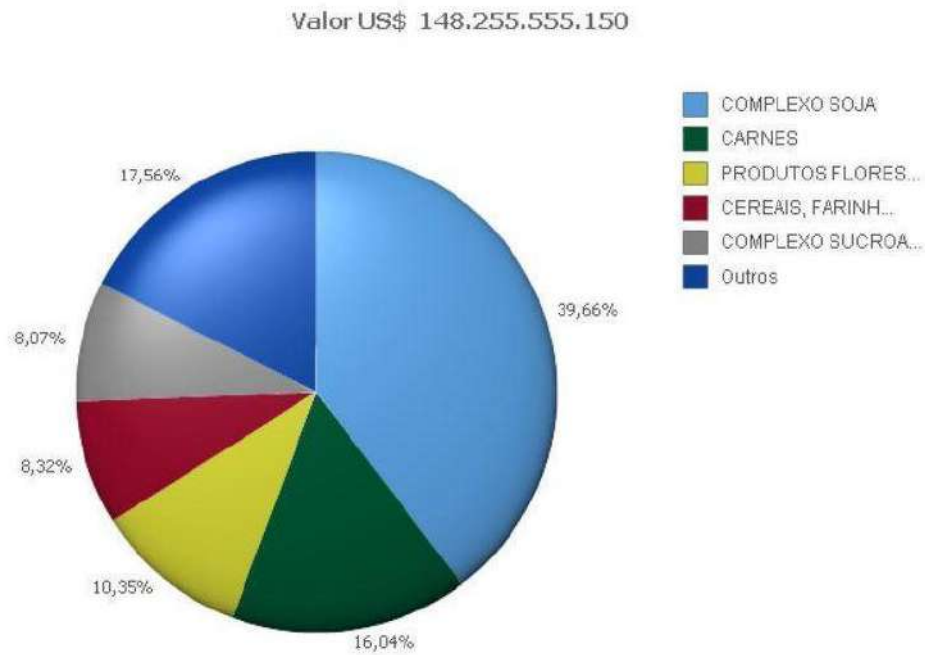
Fonte: MAPA (AGROSTAT)

Figura 11: Exportações brasileiras do agronegócio por UF em 2022



Fonte: MAPA (AGROSTAT)

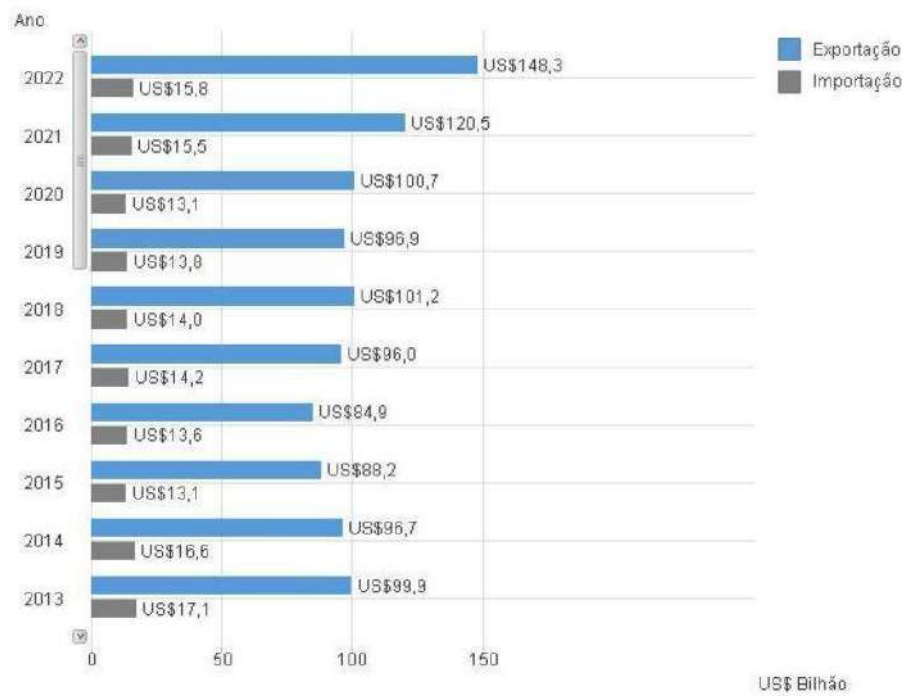
Figura 12: Exportações brasileiras do agronegócio por setores em 2022



Fonte: MAPA (AGROSTAT)

A balança comercial brasileira é fortemente superavitária, como pode ser visto na figura 13, com crescimento contínuo das exportações na última década e na atual. Esse superávit tem importante reflexo na balança comercial geral, item importante na economia de qualquer país.

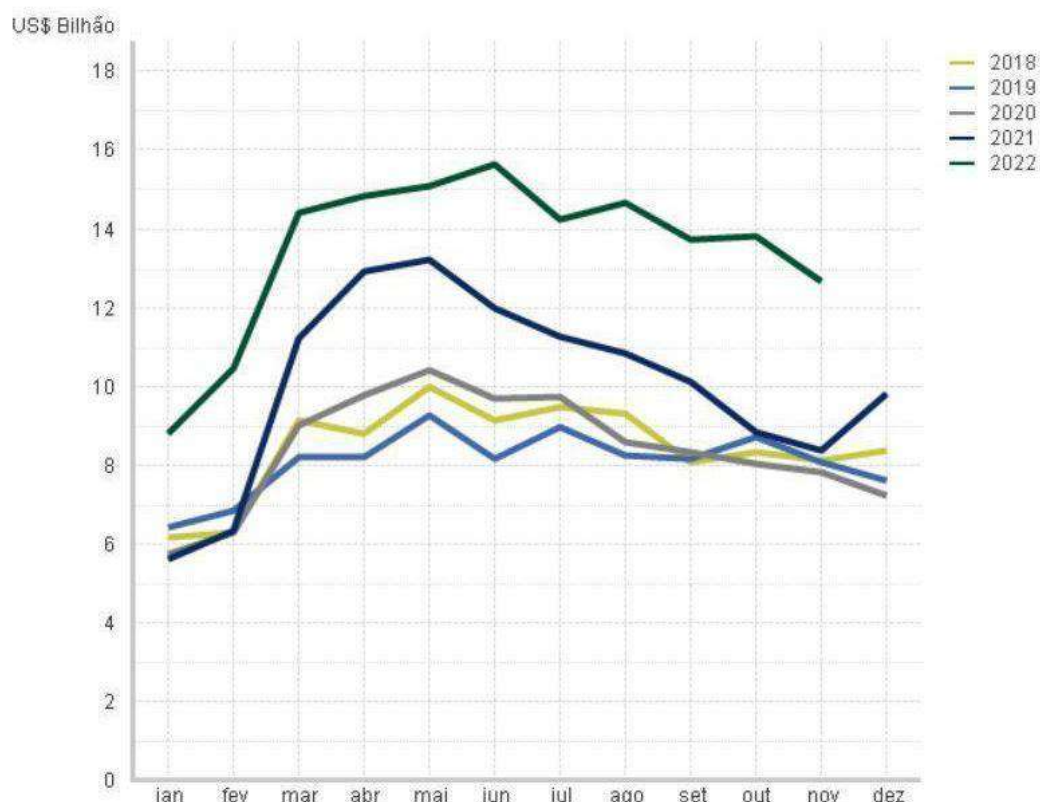
Figura 13: Balança comercial do agronegócio - série histórica



Fonte: MAPA (AGROSTAT)

A figura 14 exibe a variação do valor de exportações mês a mês está ligada a safra dos produtos, que não é constante durante o ano todo. Em diferentes anos as variações são muito parecidas.

Figura 14: Exportações brasileiras do agronegócio por mês - últimos 5 anos



Fonte: MAPA (AGROSTAT)

2.1.1.4 Impacto no PIB

A participação da agropecuária no PIB brasileiro tem dois tipos principais de abordagem. A abordagem do IBGE diz respeito a produção agropecuária “dentro da porteira”, e foi de 4,8% na média entre 1995 e 2021. Na abordagem do CEPEA, que mede a dimensão das cadeias como um todo, também chamado de agronegócio, a média no mesmo período foi de 23%.

O IBGE agrupa as atividades econômicas do país segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE (versão 2.0), compatível com classificações adotadas internacionalmente. Atualmente, a divulgação de informações do valor adicionado setorial (que pode ser entendido na prática como PIB dos setores) é feita para as seguintes atividades agregadas: **agropecuária**; indústria (desagregada em extrativa, transformação, construção e produção e distribuição de eletricidade e gás, água, esgoto e limpeza urbana); e serviços (desagregado em comércio, transporte, armazenagem e correio, serviços de informação, intermediação financeira e previdência complementar, outros serviços;

atividades imobiliárias; administração, saúde e educação públicas e seguridade social). A agropecuária (seção A da CNAE) é o setor que explora os recursos naturais vegetais e animais, abrangendo atividades de cultivo agrícola, de criação e produção animal; de cultivo de espécies florestais; de extração de madeira em florestas nativas, de coleta de produtos vegetais e de exploração de animais silvestres em seus habitats naturais; além da pesca extrativa e da aquicultura. Os números de PIB da agropecuária do IBGE são como produção “dentro da porteira”.

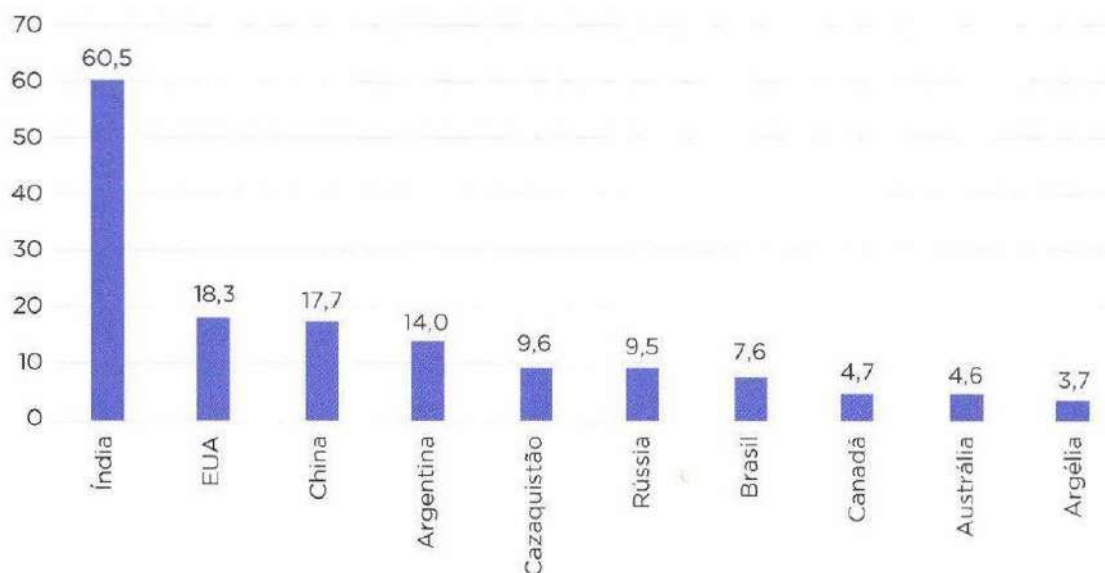
O CEPEA utiliza informações secundárias do IBGE para calcular o que é o PIB do agronegócio, aqui entendido como um setor mais amplo e abrangente do que a agropecuária, pois engloba também atividades econômicas de outros setores como indústria e serviços. A produção de insumos para a agropecuária, a própria agropecuária, as agroindústrias de processamento dessas matérias-primas e a distribuição e demais serviços necessários para que os produtos agropecuários e agroindustriais cheguem ao consumidor final são todos englobados neste conceito de agronegócio. O agronegócio não é um setor nas contas do IBGE, porém há grande interesse em saber qual a influência dele na economia brasileira. Este cálculo é realizado pelo CEPEA com o apoio da CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil). O impacto do agronegócio na economia é medido em várias partes do mundo, cada um com suas peculiaridades, não apenas no Brasil. É um conceito que ganhou importância no Brasil a partir da década de 1990. Para não incorrer em duplas contagens, a abordagem de valor adicionado é utilizada, para isso deve-se descontar do valor do setor de interesse, o valor do que foi adquirido de outros setores.

2.1.1.5 Áreas agricultáveis

A estimativa de áreas cultivadas no Brasil e no mundo era feita com base em estatísticas nacionais, muitas vezes com diferentes metodologias. Um estudo recente do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e da Agência Espacial Norte-Americana (NASA), trouxe uma nova perspectiva para este tipo de estimativa. Com base no levantamento feito pelo satélite Landsat 8, foi publicado em 2017 o mapeamento e o cálculo das áreas cultivadas no planeta. Foi um trabalho de duas décadas e com detalhe de 30 metros relativo ao satélite. Nestes cálculos não entraram áreas de exploração e plantio florestal e de reflorestamento, apenas lavouras. O total de lavouras encontradas no mundo foi de 1,87 bilhão de hectares. O Brasil aparece em quinto lugar em extensões cultivadas, com 63.994.479 hectares (7,6% da área do país). Com extensões maiores que o Brasil temos a Índia (179,8 milhões de hectares), Estados Unidos (167,8 milhões de hectares), China (165,2 milhões de hectares) e Rússia (155,8 milhões de hectares). A figura 15 exhibe em termos de porcentagem a área cultivada de cada país. Índia, Estados Unidos e China vem nesta ordem também, já Rússia e Brasil caem para sexto e sétimo lugar respectivamente.

O gráfico mostra o percentual das áreas cultivadas em relação à área total dos dez maiores países do mundo.

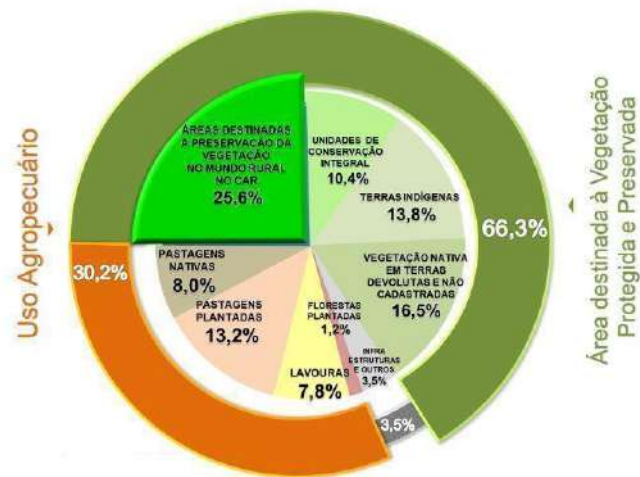
Figura 15: Percentual das áreas cultivadas em relação à área dos dez maiores países em extensão territorial



Fonte: Nasa

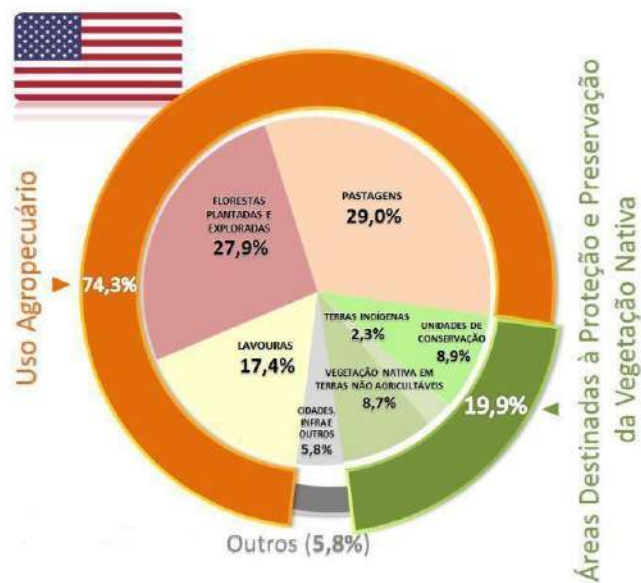
Como já foi dito, o Brasil utiliza apenas 7,6% do seu território, ao passo que a maioria dos países utiliza de 20 a 30% de seus territórios com agricultura. Com uma média de utilização alta, os países da União Europeia utilizam entre 45 e 65% de seus territórios com agricultura. Entre os países com grandes extensões territoriais a média de utilização é de 17,4% e 10,9% para áreas protegidas (Miranda, 2018). Desses países, o Brasil só cultiva mais do que Canadá e Austrália, por estes países terem amplas áreas inaptas à agricultura. A Embrapa Territorial estimou em 2017, que o Brasil preserva 66,3% de seu território, ou seja, 563.736.030 hectares. Este percentual de áreas preservadas é muito maior do que a maioria dos países, ou seja, existe potencial para o país crescer sua área utilizada com agricultura e ainda assim continuar sendo um dos que mais conservam suas florestas. Para ilustrar esta diferença, as figuras 16 e 17 fazem uma comparação do uso da terra no Brasil e no Estados Unidos.

Figura 16: Uso da terra - Brasil



Fonte: Embrapa

Figura 17: Uso da terra - Estados Unidos



Fonte: Embrapa

Como exemplo de nova fronteira agrícola brasileira, temos a região conhecida como Matopiba. Região formada pelos estados do Tocantins e partes dos estados do Maranhão, Piauí e Bahia, o nome é um acrônimo formado pelas siglas dos quatro estados (MA + TO + PI + BA) como pode ser visto no mapa da figura 18. Teve forte expansão agrícola a partir de meados da década de 1980. Essa expansão ocorreu graças à disponibilidade de tecnologias desenvolvidas especialmente para a região. O baixo custo das terras, comparadas às regiões consolidadas do Centro-Sul, associadas a sistemas de produção intensivos desde a implantação e com alta produtividade, consolidaram esta

nova fronteira agrícola. Por meio de decreto presidencial foi delimitada, em 2015, a região de Matopiba. Com grandes colheitas de soja, milho e algodão, a região também conta com produção de frutas, raízes, tubérculos, espécies florestais e pecuária. Como ideia da grandiosidade das colheitas, em região outrora decadente, a safra de soja e milho em 2018 foi de quase 15 milhões de toneladas, o equivalente a 10% da produção nacional. Conforme levantamento na página virtual da Secretaria de comunicação do Estado de Tocantins, a região de Matopiba apresenta os seguintes números:

- Quatro estados;
- 31 microrregiões;
- 337 municípios;
- Área total: 73,1 milhões de hectares (51% da área dos quatro estados). O Tocantins tem 37,95% da área, enquanto o Maranhão conta com 32,77%, seguido da Bahia, com 18,06%, e Piauí, com 11,21%;
- O Matopiba abrange os biomas Cerrado com 90,94% (de toda a área), Amazônia, com 7,27%, e Caatinga, com 1,64%;
- Existem na área cerca 324 mil estabelecimentos agrícolas, 46 unidades de conservação, 35 terras indígenas, 36 quilombolas e 1.053 assentamentos de reforma agrária.

Figura 18: Matopiba: Nova fronteira para a agricultura do Brasil



Fonte: Governo do Estado de Tocantins (SECOM)

2.2 Fertilizantes

A chamada Revolução Verde foi um período com início na década de 1960, de invenção e disseminação de novas práticas agrícolas, mecanização e redução do uso de mão-de-

obra, além do uso intensivo de insumos industriais. Permitiu um grandioso aumento na produção agrícola, inicialmente na Europa e nos Estados Unidos, e posteriormente em vários outros países do mundo. A Revolução Verde deu origem a um mercado global bilionário de fertilizantes.

2.2.1 Definição de fertilizantes

A Lei 6894, de 16 de dezembro de 1980 define o que é fertilizante. Define ainda corretivo, inoculante, estimulante ou biofertilizante. Esta lei foi alterada pela Lei 12890, de 10 de dezembro de 2013, onde foram incluídos remineralizador e substrato para plantas, entre outras alterações. Segundo a Lei 6894, fertilizante é a substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes vegetais.

2.2.2 Macro e micronutrientes

Para que uma planta complete seu ciclo de vida é imprescindível o fornecimento de nutrientes denominados essenciais. Os macronutrientes primários N (nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio), que, misturados, são os fertilizantes NPK; macronutrientes secundários: Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Os micronutrientes são: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Zinco (Zn), Cobalto (Co), Silício (Si), entre outros (Reetz, 2016).

2.2.2.1 Nitrogênio

Componente de aminoácidos e proteínas, faz parte também da molécula de clorofila, controladora da fotossíntese, que vem a ser a forma de captura de energia do sol feita pelas plantas. Sua suplementação nas culturas é necessária para o processo de fotossíntese e produção de proteínas. Elemento extremamente reativo, forma numerosos compostos bioquímicos nas plantas, além de exercer várias funções no crescimento e desenvolvimento das plantas. Por ser um elemento extremamente reativo, isto torna o seu manejo mais complicado, porém aumenta as formas de manejo possíveis. Em decorrência do impacto que pode ter no ambiente, o manejo do nitrogênio é extremamente importante. Como exemplos, o nitrato-N é um nutriente que promove o crescimento de algas e plantas aquáticas, à medida que estas morrem e se decompõem, fixam o oxigênio da água, que irá faltar para os animais aquáticos. Outro exemplo é a liberação do nitrogênio do solo para a atmosfera como N_2O , sendo este 300 vezes mais potente do que o CO_2 como gás de efeito estufa. Estes dois exemplos mostram como é importante reduzir a liberação de formas reativas de N no meio ambiente.

Os fertilizantes nitrogenados provem basicamente da amônia anidra, que é obtida a partir do ar e gás natural pelo processo Haber-Bosch. Graças a este processo, desenvolvido na Alemanha logo antes da 1ª guerra mundial, a maior parte dos alimentos é produzida hoje em dia, pois a amônia é a principal matéria prima para a fabricação da maioria dos fertilizantes nitrogenados, como por exemplo, Aquamônia (20 a 24% de N), Sulfato de amônio [(NH₄)₂SO₄] (21% de N), Uréia (46% de N), Nitrofosfato (concentrações variadas), Nitrato de amônio (NH₄NO₃), Nitrato de amônio-uréia (UAN) (28% de N), Cianamida cálcica (18% de N).

2.2.2.2 Fósforo

O fósforo atua na captura e transferência de energia para as ligações químicas na fotossíntese. Além disso, exerce papel fundamental no metabolismo de açúcares e amidos, críticos nos processos de divisão celular e crescimento. Em termos ambientais, excesso de fósforo no suprimento leva a crescimento excessivo (como no caso de explosão de algas), com subsequente morte das culturas e criação de ambiente hipóxico. Os principais fertilizantes fosfatados são Fosfato de rocha (FR), Superfosfato simples (SSP), Superfosfato triplo (TSP) [Ca(H₂PO₄)₂.H₂O], Fosfato de monoamônio (NH₄H₂PO₄) (MAP), Fosfato de diamônio [(NH₄)₂HPO₄] (DAP), Polifosfato.

2.2.2.3 Potássio

Elemento encontrado em todas as células vivas, no solo é encontrado em pequenas quantidades como o cátion K⁺, forma na qual é absorvido pelas plantas, participando de vários processos no solo. Como exemplo destes processos, regula o fluxo de água e outros materiais através das membranas celulares. Além disso, ajuda a regular vários processos químicos e enzimáticos. O potássio não forma compostos nas plantas, porém, por fazer o movimento para dentro e fora das células através das membranas, atua no balanço iônico das cargas elétricas. Com isso, o potássio é essencial para a absorção de nutrientes e na manutenção do balanço hídrico nas plantas. Os principais fertilizantes potássicos são Cloreto de potássio (KCl), Sulfato de potássio (K₂SO₄), Sulfato de potássio e magnésio (K₂SO₄.2MgSO₄), Nitrato de potássio (KNO₃). Estes fertilizantes são formados de depósitos geológicos salinos. Os fertilizantes potássicos são usualmente descritos na forma K₂O. Materiais não refinados podem ser usados diretamente no solo, apesar da baixa concentração de K₂O.

2.2.2.4 Enxofre

Precisa ser mineralizado para o ânion sulfato (SO_4^{-2}) para ser absorvido pelas plantas. No solo, o enxofre é encontrado principalmente como sulfatos inorgânicos e compostos orgânicos. As principais formas de fornecer enxofre para as plantas são: Enxofre elementar (0-0-0-90 S), Sulfato de amônio (21-0-0-24 S), Sulfato de cálcio (Gesso) (24% de S), Superfosfato simples (SSP) (0-20-0); 8 a 10% de S), Tiosulfato de amônio (26% de S).

2.2.3 Tipos

As classificações de fertilizantes diferem ligeiramente na literatura, neste trabalho foi utilizada a classificação mais abrangente possível para englobar vários tipos existentes de fertilizantes.

2.2.3.1 Mineral

É o fertilizante retirado diretamente de depósitos minerais na natureza e que é vendido diretamente ou com mínimo de processamento, como por exemplo moagem.

2.2.3.2 Sintético/Químico

Este tipo de fertilizante provém de alguma rota/processo industrial, não é encontrado diretamente na natureza.

2.2.3.3 Orgânico/Biofertilizante

A Comissão Europeia estabeleceu uma meta de redução de 30% nas fontes não renováveis usadas na produção de fertilizantes. Fertilizantes orgânicos, ou simplesmente biofertilizantes, são os fertilizantes de origem natural provenientes de seres vivos. Eles podem ser a partir de substâncias geradas por eles ou partes deles. Devido ao aumento da população e da demanda por alimentos, é essencial atender às necessidades alimentares sem degradar ainda mais o meio ambiente (Ronga et al., 2019). Na agricultura, devido à crescente demanda por sustentabilidade, há a necessidade de se optar por fertilizantes naturais ou biológicos em substituição aos fertilizantes sintéticos (Tahami, 2017). Assim, há uma necessidade urgente de substituir fertilizantes químicos e pesticidas por opções ecologicamente corretas que melhorem o rendimento das culturas e o valor nutricional

em meio às mudanças climáticas no que é denominado “agricultura inteligente para o clima” (Campbell, 2014).

As práticas convencionais de produção de alimentos utilizam uma grande quantidade de produtos químicos como fertilizantes/promotores de crescimento de plantas, herbicidas/pesticidas, degradando assim o meio ambiente por meio da eutrofização e aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, a produção atual não atinge o valor exigido principalmente devido à sua baixa eficiência na absorção de nutrientes pelas culturas. As culturas absorvem aproximadamente 31–49% do nitrogênio fornecido e 45% do fósforo fornecido. Portanto, enormes quantidades de nutrientes estão sendo perdidas para os campos por meio de desnitrificação, volatilização, lixiviação, perdas por escoamento superficial e mineralização (Francisca, 2018). Essa ineficiência está causando o acúmulo de nutrientes em solos e cursos d'água e somando a emissão de uma série de gases para a atmosfera. Conseqüentemente, os nutrientes acumulados estão contribuindo para a acidificação e eutrofização do solo e dos corpos d'água e os gases adicionados à atmosfera estão contribuindo para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio estratosférico. Portanto a substituição dos fertilizantes minerais e químicos tem grande importância na agricultura, por se tratarem de recursos finitos e seus impactos negativos na natureza, respectivamente e os biofertilizantes são a melhor alternativa para essa mudança.

2.2.3.4 Bioestimulantes

O mais recente regulamento da UE regulamento 2019/1009 estabelece que: “bioestimulante vegetal” significa um produto que estimula os processos de nutrição vegetal independentemente do teor de nutrientes do produto com o único objetivo de melhorar uma ou mais das seguintes características da planta ou da rizosfera vegetal: uso de nutrientes eficiência; tolerância ao estresse abiótico; características de qualidade; disponibilidade de nutrientes confinados no solo ou na rizosfera. Na literatura científica, quatro grupos principais de bioestimulantes foram descritos: substâncias húmicas, hidrolisados de proteínas e formulações de aminoácidos, extratos de algas marinhas e microrganismos promotores do crescimento de plantas (Shakeel A. Khan, 2018) . Portanto, bioestimulantes não precisam conter nutrientes, mas apesar da ausência deles conseguem promover o crescimento das plantas.

Os fitohormônios são moléculas de ocorrência natural que, em concentrações muito baixas, influenciam e controlam o crescimento e desenvolvimento em plantas. Essas moléculas compreendem diversas classes, como auxinas, citocininas (CK), giberelinas (GAs), ácido abscísico (ABA), etileno (ETH), salicilato (SA), jasmonato (JA), brassinosteroides (BR) e estrigolactonas (SL) [21]12*. Diferentes estudos consideram os efeitos de fitohormônios exógenos na produção de biomassa microalgal e substâncias bioativas. No entanto, poucos estudos se concentraram na influência dos fitohormônios no tamanho da célula e nas alterações morfológicas nas microalgas (Zapata, 2021).

A germinação é regulada principalmente pelos fitohormônios ABA que ativam a dormência das sementes, citocininas que aumentam a germinação em condições de estresse, brassinosteróides que controlam os efeitos inibitórios do ABA, etileno que aumenta durante a germinação para proteger as sementes do estresse e ácido giberélico que libera as sementes da dormência. A ativação do ácido giberélico (GA3) é necessária para acabar com a dormência das sementes (M.R.Suchithra, 2021).

2.2.3.3.1 Tipos de biofertilizante

2.2.3.3.2 Origem animal

Esterco e urina são comumente aplicados como biofertilizantes. Por se tratar de biomassa rica em carbono e macronutrientes e provenientes de resíduos, trata-se de uma alternativa barata aos outros fertilizantes na agropecuária. A Embrapa realiza vários estudos na área, recentemente a Embrapa Hortaliças (DF) e a empresa LJIL Incubadora produziram fertilizantes a partir de resíduos da avicultura obtendo resultados promissores nos testes com tomates e alface. Na década de 90 estudos foram realizados onde resíduos da suinocultura e avicultura tinham o seu potencial nutricional analisado, dependendo das características do solo a ser aplicado caso os fertilizantes gerados não contivessem as concentrações necessárias eram suplementados com outros fertilizantes, mesmo assim diminuindo-se a demanda por fertilizantes e contribuindo economicamente para a agricultura brasileira.

2.2.3.3.3 Origem vegetal

Os resíduos agrofloretais são comumente usados como fertilizantes orgânicos ou complementam a ração animal. Folhas, serragem, grama cortada, ou resíduos de outras

práticas agrícolas como o bagaço da cana-de-açúcar, a vinhaça e a palhada de milho são adicionados ao solo e através da ação de microrganismos, os seus nutrientes são absorvidos pelas plantas cultivadas.

2.2.3.3.4 Digestão anaeróbia

Bactérias anaeróbias por muito tempo têm sido usadas tanto para compostagem quanto no tratamento de efluentes. Assim é possível se gerar biogás que pode ser purificado, concentrado e canalizado, ou produzir-se bioenergia.

2.2.3.3.5 Microalgas

As microalgas podem ser cultivadas sob diversas condições e ecossistemas, como na água do mar, água doce e efluentes. A biomassa de microalgas é considerada um fertilizante orgânico de liberação lenta, evitando perdas de nutrientes do solo por meio de uma liberação gradual de macro e micronutrientes. Pesquisas mostram que, após a fertilização da biomassa de microalgas, o nitrogênio disponível para as plantas aumentou de 1-4% a 41% após 63 dias. Portanto, espera-se que o organismo das microalgas não exceda a demanda de nutrientes da cultura. Esta é uma vantagem em comparação com outras formas de recuperação de nutrientes de resíduos orgânicos, como a aplicação de esterco na agricultura, que pode causar contaminação de nitrogênio nas águas e subterrâneos e gerar a volatilização de NH_3 (Shakeel A. Khan, 2018).

Por serem passíveis de serem produzidas em efluentes, impacta-se na diminuição de custos e a capacidade de produção mais controlada e sustentável, levou à mudança de foco dos biofertilizantes de macroalgas para os de microalgas. Por serem facilmente cultivadas usando-se sistemas de lagos abertos, fotobiorreatores ou em efluentes pré-tratados implica-se em uma conveniência do cultivo de microalgas.

Mas a aplicação de microalgas na agricultura apresentam alguns desafios, a ausência de um procedimento universal de preparação do extrato, a falta de conhecimento do melhor momento e método de aplicação, bem como a falta de conhecimento dos efeitos específicos de cepas de microalgas são alguns deles. Para a produção do extrato alguns procedimentos como ruptura celular pode exigir tecnologias não dominadas, como a técnica de “explosão de células” e produtos químicos, como formalina, para conservação (Stirk and Van Staden, 2006). Esses requisitos tornam todo o processo trabalhoso mais

demorado e caro . Para viabilizar o uso do microalgas na agricultura, esses obstáculos devem ser superados, por exemplo, reduzindo as etapas de processamento das algas antes da aplicação nas plantas. Assim, a aplicação de células vivas pode ser uma das opções convenientes. Se for necessário a ruptura celular, o ideal seria que nenhum produto químico fosse adicionado para manter a produção sustentável.

Na agricultura, extratos derivados de microalgas mostraram várias atividades bioestimulantes nas plantas, melhorando sua germinação e absorção de nutrientes, afetando a produção de biomassa, induzindo a formação e expansão das raízes e aumentando a resistência a estresses abióticos. Estudos mostram que quando comparadas com as amostras de controle sem a adição de qualquer bioestimulante, as microalgas reduziram significativamente a produção de radicais superóxidos e aumentaram significativamente a presença de enzimas antioxidantes, implicando que o estresse abiótico altera o metabolismo oxidativo. Com o uso extrato de *Arthrospira maxima* e *Chlorella ellipsoidea* aumentou-se a produção de antioxidantes e proteínas nos grãos de trigo, o que melhorou a tolerância do trigo à salinidade (Batalha de Souza, 2018). Já em outros observou-se que os compostos de *Scytonema hofmanni* contêm hormônios de crescimento de plantas semelhantes a GAs que neutralizam os efeitos da homeostase hormonal alterada de mudas de arroz sob estresse salino.

2.2.4 Técnicas de aplicação

Diferentes técnicas de aplicação de fertilizantes são executadas na agricultura. Algumas delas usam fertilizantes líquidos ou sólidos, conferindo diferentes taxas de absorção, perdas para o meio e contaminação do solo e águas residuais ou subterrâneas, complexidade na aplicação e custos, sendo que as aplicações na forma líquida correspondem a 90% dos casos. Os biofertilizantes microalgais foram identificados em várias delas.

2.2.4.1 Fertirrigação

A fertirrigação é a forma mais comum de adubação, nela os fertilizantes são dissolvidos na água e aplicados junto à irrigação. Esta é forma mais comum de se adicionar fertilizantes nitrogenados, como os fertilizantes químicos nitrato de amônia e ureia e biofertilizantes de origem animal como urina, provenientes da digestão anaeróbia e microalgas. No caso das microalgas células vivas podem ser diretamente aplicadas,

podendo-se assim se multiplicar e alterar as propriedades do solo e as comunidades microbianas por meio da liberação contínua de compostos bioativos (Margaret Mukami Gitau, 2022).

A principal vantagem é a praticidade na aplicação, um simples sistema de mangueiras é o suficiente para a sua adoção, o baixo custo por ser aplicado junto à água diminuindo o custo energético e a fácil correção na sua concentração no sistema de irrigação permitem a correta aplicação de nutrientes. Mas algumas desvantagens devem ser destacadas, a água da fertirrigação tem que ser devidamente separada da água usada em outras partes da unidade agrícola como a utilizada na pecuária e doméstica, demanda-se muita água e a sua baixa disponibilidade ou racionalização pode inviabilizar a sua utilização ou acarretar na necessidade do uso de compressores.

2.2.4.2 Spray foliar

A aplicação sob a forma de spray foliar é uma técnica de adubação das plantas com a aplicação de fertilizante líquido diretamente nas folhas. Os nutrientes podem ser absorvidos através de seus estômatos e também através de sua epiderme. A absorção é normalmente é mais rápido através dos estômatos, mas a epiderme tem capacidade de absorver os nutrientes em maior quantidade

2.2.4.3 Pré-tratamento das sementes

O pré-tratamento das sementes traz uma série de facilidades na germinação delas. Primeiro aumenta-se a taxa de embebição, que se trata da difusão de líquido para sólido, que neste caso é da água para dentro da semente, promovendo o transporte de nutrientes e metabólitos solúveis em água para dentro da semente. Segundo amacia a casca. E por fim regula os processos pré-germinativos e bioquímicos para iniciar o crescimento e o crescimento das raízes (Barone et al., 2018). Estudos mostraram que as sementes pré-tratadas com extratos de microalgas têm maior germinação e taxa de crescimento da planta, juntamente com maior teor de carboidratos solúveis, proteínas e aminoácidos livres (Mobin, 2017).

Muitas vezes, devido a problemas físico-químicos associados à estrutura do solo, os nutrientes essenciais no biofertilizante aplicado diretamente no solo podem não chegar às

plantas, portanto o pré-tratamento das sementes pode ser a melhor técnica de aplicação adotada (Ronga et al., 2019).

2.2.4.3 Hidroponia

Hidroponia é caracterizada pelo cultivo de plantas sem a necessidade de terra. Nele as plantas ficam com as raízes imersas dentro da água, onde são adicionados nutrientes em quantidades necessárias para que elas possam absorvê-los e se desenvolverem. Alguns estudos mostraram que o co-cultivo de microalgas e plantas em sistemas hidropônicos podem resultar em maior produtividade devido ao início de interações metabólicas positivas (Flavio Martini, 2017).

Nos sistemas hidropônicos comumente é aplicado efluentes tratados da agroindústria, na indústria sucroalcooleira vinhaça é produzido e devido à sua grande DBO frequentemente ela é biorremediada e a corrente tratada segue para prover nutrientes para o plantio.

2.2.4.4 Fertilização sólida

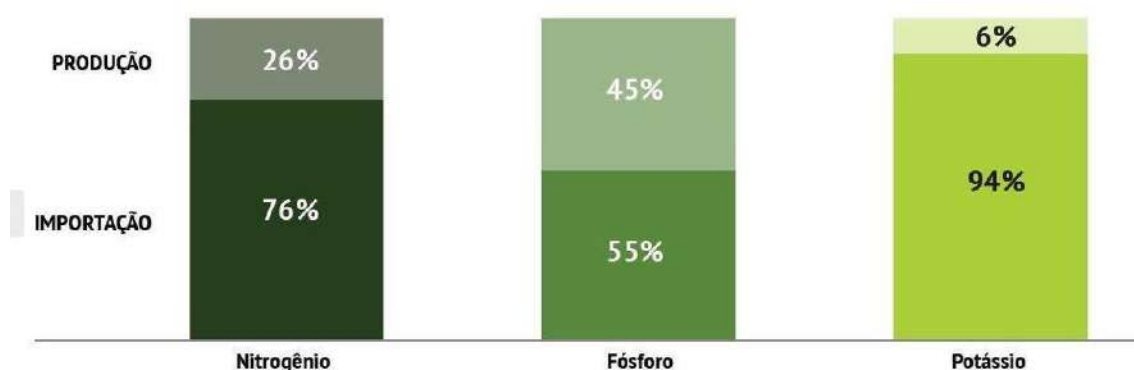
Na fertilização sólida os fertilizantes em estado sólido são diretamente adicionados no solo. A sua granulometria varia de caso a caso, fertilizantes minerais rochosos normalmente são aplicados com alta granulometria, isso promove uma liberação mais lenta dos nutrientes, diminuindo-se a adição constante de fertilizantes e evitando-se a contaminação do solo, às vezes são adotadas a combinações dos mesmos fertilizantes sob diferentes granulometria.

Microalgas podem ser aplicadas ainda vivas no solo, assim eles conseguem evitar o estresse abiótico das plantas, permitindo-se a germinação das sementes. Já em outros casos elas são submetidas à digestão anaeróbia produzindo-se biochar que então é aplicado no solo.

2.2.5 Produção e demanda de fertilizantes no Brasil

O Brasil ocupa hoje o quarto lugar em utilização de fertilizantes no mundo (8% do total), atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. Dos três primeiros, China e Estados Unidos, além de grandes consumidores, são também grandes exportadores. A figura 19 ilustra a produção e importação dos três principais elementos fertilizantes, sendo o Brasil fortemente dependente de importações.

Figura 19: Relação produção/importação dos fertilizantes NPK por elemento



Fonte: MAPA

Produção e importação dos principais elementos fertilizantes.

2.3 Microalgas

2.3.1 Definição

As microalgas são um grupo diverso de microrganismos fotossintéticos eucarióticos e procarióticos que podem crescer rapidamente e viver em condições adversas devido à sua estrutura unicelular (Farid Rachidi, 2020). Eles constituem um grupo diversificado de organismos com uma ampla gama de características fisiológicas e bioquímicas. Assim, produzem naturalmente muitos compostos bioativos diferentes, nomeadamente, proteínas, lípidos, carotenóides, vitaminas e polissacáridos (Luiz Gabriel Gemin, 2019).

O cultivo das microalgas pode tanto ser feito na água do mar, água doce e efluentes, que dependendo dos contaminantes e suas concentrações devem passar por uma etapa de pré-tratamento (Rajaa Kholssi, 2021).

As microalgas são ricas em biodiversidade, com cerca de 200.000 a 800.000 espécies encontradas em todo o mundo (Starckx, 2012) e sua excepcional capacidade de adaptação permite que elas se desenvolvam em diversos ambientes, tornando-as boas candidatas, não apenas para biorremediação, mas também para a produção de biocombustíveis e biofertilizantes (Chandan Mukherjee, 2020).

2.3.2 Composição

O crescimento e a composição das microalgas dependem da disponibilidade de nutrientes no meio, da distribuição da irradiação solar ou outra fonte de luz dentro da cultura e das condições ambientais. A luz é um dos parâmetros mais importantes a considerar. Quando cultivadas dentro de um reator a distribuição de luz dentro dele não afeta apenas a morfologia dos filamentos, mas também tem forte influência na taxa de crescimento e na composição das microalgas. Existem estudos sobre o efeito da intensidade da luz na taxa de crescimento, teor de lipídios, carboidratos e proteínas, bem como a concentração de pigmentos na *Spirulina platensis* (Daniela Zapata, 2021). Porém, até onde sabemos, poucos estudos foram realizados sobre os níveis de compostos bioativos em microalgas dependendo da intensidade da luz quando cultivados em efluentes, portanto, o impacto na sua composição e a sua aplicabilidade é de suma importância.

Quando cultivadas em efluentes, a qualidade da biomassa e de seus bioprodutos dependem da capacidade das cepas de se adaptar e aclimatizar nesses meios, afetando a sua morfologia e afetando os custos de colheita.

2.3.3 Biorrefinaria e bioprodutos

Microalgas possuem um vasto número de espécies sendo que somente para o tratamento de efluentes mais de 50 espécies foram encontrados, elas como dito anteriormente são capazes de produzir um grande número de compostos bioativos passíveis de ser utilizados pelas mais diferentes áreas. Esses compostos podem ser usados para produção de bioenergia e biocombustíveis, biofertilizantes, bioestimulantes, nutracêuticos, pigmentos, bioplástico entre outros (Wang, 2018).

Mas os custos do seu cultivo, colheita e downstream podem inviabilizar o uso em tais áreas, então a biorrefinaria e a sua capacidade de gerar vários coprodutos de alto valor agregado apresenta-se como solução.

O fato da maior parte delas não produzir componentes tóxicos que possam comprometer a segurança da biomassa microalgal faz com que sejam passíveis de várias aplicações biotecnológicas. Os polissacarídeos de microalgas, especialmente os polissacarídeos sulfatados, são explorados em diferentes campos devido às suas propriedades biológicas, incluindo atividades anticoagulantes, anti-inflamatórias, antivirais e antitumorais e

também por sua boa biocompatibilidade, biodegradabilidade, não toxicidade, baixo custo e abundância (Farid Rachidi, 2020).

Mas os altos custos associados ao processo de produção tornam desafiadora a realização comercial de bioprodutos à base de microalgas, os elevados custos são principalmente devido ao cultivo, colheita e downstream, portanto a sua produção em larga escala é comumente desestimulada devido ao grande investimento financeiro necessário. Avaliações econômicas indicam sua não competitividade na indústria, especialmente para a produção de biocombustíveis (K. Pooja, 2022).

O maior problema frente o cultivo de microalgas é devido à alta necessidade de nutrientes e água, mas a capacidade de se produzir microalgas a partir de efluentes pode mitigar esses custos. Vários métodos são usados para colheita de microalgas (centrifugação, sedimentação celular, floculação, flotação, entre outros. Os problemas associados ao downstream são o rompimento celular para liberar os compostos e a separação dos compostos de interesse.

Mas algo que pode viabilizar a sua produção é a capacidade de gerar vários produtos de valor agregado simultaneamente. As biorrefinarias permitem maior ganho financeiro com menor custo de produção, maior aproveitamento da matéria-prima, geração simultânea de vários produtos de interesse e impactos ambientais positivos para a saúde humana e ambiental (biorremediação e mitigação de GEEs), com implicações na segurança energética e alimentar, bem como na mitigação das mudanças climáticas. Os sistemas de tratamento de efluentes com microalgas são uma solução promissora não só para o tratamento de águas residuais, mas também para impulsionar a economia circular no setor da água através da recuperação de produtos à base de microalgas. Todos esses fatores econômico-ambientais e a caracterização cíclica das biorrefinarias faz com que elas estejam inclusas no não somente na economia circular como sendo uma valiosa estratégia para aumentar a receita (Gabriela F. Ferreira, 2021).

Alguns exemplos de possibilidade de uso das biorrefinarias são durante a produção de biodiesel, pois logo após a extração do óleo da biomassa, quase 65% da biomassa sobra como resíduo (Chandan Mukherjee, 2020). Nitrogênio e fósforo são ricos nessa biomassa residual e podem ser explorados de forma viável como biofertilizante. Como dito anteriormente, o uso de águas residuais para produção de biomassa é uma característica

promissora do cultivo de microalgas e uma vez que os sistemas de tratamentos podem ser acoplados a unidades industriais capazes de gerar bioprodutos de alto valor agregado.

2.3.3.1 Bioenergia e biocombustíveis

Bioenergia

Bioenergia é a energia renovável derivada de fontes naturais ou biológicas. A bioenergia é muitas vezes referida como uma fonte de energia renovável e sustentável. Tornou-se recentemente uma importante área de pesquisa para cientistas de todo o mundo, pois trata-se ótima solução de curto e médio prazo para conter o aquecimento global e fornecer energia limpa.

A partir de microalgas uma grande variedade de biocombustíveis pode ser geradas, assim como bioeletricidade, entre elas nós temos o biogás, bioetanol e biodiesel. Eles oferecem muitas vantagens em relação aos combustíveis fósseis, sendo elas estarem prontamente disponíveis a partir de fontes comuns e renováveis de microalgas, contribuirão para o ciclo do CO₂ quando queimados, beneficiarem o ambiente, a economia e os consumidores, serem biodegradáveis, contribuirão para a sustentabilidade a longo prazo e inclusos na bioeconomia circular (Schuurmans, 2015).

Biodiesel

O biodiesel é um combustível sustentável produzido a partir de biomassa renovável e lipídios não utilizados que podem substituir o diesel de petróleo. Ele pode reduzir as emissões de CO₂ em 78,5% em comparação com o diesel derivado do petróleo. O conteúdo lipídico da biomassa de algas afeta a qualidade e a produção de biodiesel e sua adequação como combustível alternativo ao diesel derivado do petróleo. Além disso, como o diesel à base de petróleo, o biodiesel produzido a partir de biomassa de algas não contém enxofre e tem menos material particulado e emissões de gases de efeito estufa (Schuurmans, 2015). No entanto, a estabilidade à oxidação do biodiesel de algas é limitada devido ao seu baixo desempenho em temperaturas frias. O biodiesel é produzido a partir de microalgas como *Chlorella* sp., *N. oculata*, *Botryococcus* sp., *Scenedesmus* sp. e *Picochlorum* sp. O biodiesel é obtido principalmente de microalgas por meio de um processo de transesterificação. A transesterificação de lipídios, principalmente triglicerídeos, na presença de álcalis ou ácidos leva à produção de biodiesel e glicerol

(Nzayisenga, 2020). A seleção da linhagem de microalgas é um fator importante para a produção de biodiesel. O número de cetano (CN), a viscosidade, o poder calorífico e o ponto de fusão determinam a qualidade do biodiesel e seu desempenho nos motores. A bioengenharia de linhagens de microalgas é um dos métodos propostos para melhorar a qualidade do biodiesel (Schuurmans, 2015). O óleo bruto extraído das algas tem uma viscosidade maior que o óleo diesel, tornando-o impróprio para uso direto em motores. Para diminuir a viscosidade e aumentar a fluidez do óleo de algas, é necessário o processo de transesterificação. Vale-se ressaltar que a presença de substâncias bioativas como a clorofila também pode comprometer o funcionamento do biodiesel.

Bioetanol

O bioetanol é por muito tempo foi biocombustível de maior sucesso que pode ser produzido a partir de biomassa de microalgas, o seu meio de produção é conhecido como etanol de terceira geração. A produção de bioetanol a partir da biomassa de microalgas tem várias vantagens, inclusive não requer grandes áreas de terra arável como o etanol derivado da cana-de-açúcar, logo não competindo com a produção alimentícia e alivia o meio ambiente ao absorver CO₂ da atmosfera. A parede celular das microalgas contém uma abundância de lipídios e carboidratos, como celulose, mananas, glicanas sulfatadas, xilanas e amido. Esses componentes complexos são quimicamente ou enzimaticamente reduzidos a açúcares simples, que são posteriormente convertidos em bioetanol sob condições anaeróbicas. O bioetanol é produzido a partir de microalgas por meio de vários processos, incluindo seleção e cultivo de biomassa de algas, pré-tratamento, liquefação, sacarificação, fermentação anaeróbica e destilação para purificação do bioetanol (Van Gerpen, 2005).

O bioetanol produzido a partir de microalgas tem potencial de rendimento quase duas vezes maior que o da cana-de-açúcar e cinco vezes maior que o do milho. Várias espécies de algas foram identificadas como significativas para a produção de bioetanol, incluindo *Chlorococcum* sp., *Spirogyra* sp., *C. sorokiniana*, *Gelidiummansii*, *Sargassum* sp., *Gracilaria* sp., *Laminaria* sp., e *Prymnesium parvum* (Van Gerpen, 2005).

Biometano

As microalgas também podem ser usadas para produzir biogás, que pode ser usado para gerar eletricidade, células de combustível e combustível líquido. A sua biomassa contém pequenas quantidades de lignina e celulose, tornando-se uma excelente matéria-prima para a produção de biogás por fermentação anaeróbica (Van Gerpen, 2005).

As microalgas são uma fonte eficaz de biogás porque contêm maiores concentrações de polissacarídeos e lipídios, nenhuma lignina e menores quantidades de celulose. Eles também são mais fáceis de colher, requerem menor área para cultivo, são facilmente convertidos em biogás e crescem mais rápido que a biomassa lignocelulósica. Além disso, a digestão anaeróbica produz resíduos sólidos que são usados como biofertilizantes (Hariz, 2017).

Microalgas tem grande potencial para geração de biogás. Muitas espécies de algas, incluindo *Scenedesmus*, *Euglena*, *Spirulina* e *Ulva*, têm sido usadas para produção de biogás (Hariz, 2017).

No entanto, várias restrições tornam a produção de biogás indesejável. A baixa relação C:N produz amônia, que é prejudicial para espécies anaeróbicas, como bactérias. Os íons de sódio também suprimem a atividade microbiana. Consequentemente, microorganismos tolerantes ao sal são recomendados para a produção de biogás por digestão anaeróbica da biomassa de microalgas (Shakeel A. Khan, 2018).

2.3.3.3 Nutracêuticos

Microalgas podem ser usada tanto pelas suas qualidades nutricionais quanto medicinais. Elas são usadas na nutrição humana, animal e considerando que os biofertilizantes são uma suplementação nutricional para plantas, podemos incluí-las neste grupo. A ampla utilização de algas na produção de alimentos não é recente, um estudo mostra evidências de que as algas foram usadas como alimento e remédio há mais de 14.000 anos (Rajaa Kholssi, 2021).

Os diversos compostos encontrados nas microalgas podem ter efeitos antiinflamatórios, antioxidantes, anticancerígenos, antibacterianos, antivirais, antifúngicos e imunoestimulantes (Nabila Shehata, 2022). Os polissacarídeos de microalgas, especialmente os polissacarídeos sulfatados, são explorados em diferentes campos devido

às suas propriedades biológicas, incluindo atividades anticoagulantes, antiinflamatórias, antivirais e antitumorais e também por sua boa biocompatibilidade, biodegradabilidade, não toxicidade, baixo custo e abundância.

Um composto de alto valor encontrado em várias microalgas é a astaxantina. Ela trata-se de um carotenoide sintetizado em algumas espécies de microalgas, é um antioxidante natural com propriedades antienvhecimento, anticancerígenas, antiinflamatórias e de aumento da imunidade. Existem duas variedades principais de astaxantina no mercado: astaxantina sintética derivada de fontes petroquímicas e astaxantina natural derivada de fontes microbianas. No entanto, o mercado de astaxantina é atualmente dominado por derivados sintéticos que detém mais de 95% da participação de mercado. Devido à maior disponibilidade, a astaxantina sintética tem um preço significativamente mais baixo em comparação com a astaxantina natural. No entanto, a astaxantina sintética tem uma capacidade antioxidante menor em comparação com sua contraparte natural e não é recomendada para consumo humano principalmente devido a preocupações com a segurança alimentar. Dentre os derivados naturais da astaxantina disponíveis no mercado, apenas a astaxantina derivada da microalga de água doce *Haematococcus pluvialis* obteve a aprovação do Food and Drug Administration (FDA), órgão governamental equivalente à brasileira ANVISA, para consumo humano. *H. pluvialis* é uma microalga unicelular reconhecida como a melhor e mais rica fonte de astaxantina natural devido à capacidade de sintetizar astaxantina em até 5% de seu peso seco (Zhao et al., 2019). No entanto, a astaxantina derivada de *H. pluvialis* corresponde apenas a uma fração do mercado que atinge aproximadamente 1% (Gannoru Kankanamalage, 2022).

2.3.4 Biorremediação

Um grande volume de esgoto é gerado todos os dias e, globalmente, mais de 80% de todas as águas residuais são descartadas sem tratamento. Portanto, globalmente, 20% de todas as águas residuais são descartadas com tratamento. Nos quais os países de renda alta, renda média alta e renda média baixa contribuem com 38%, 28% e 8%, respectivamente. Apenas nas áreas urbanas da Índia são gerados 61.948 milhões de litros por dia (MLD) dos quais apenas 23.277 MLD são tratados. As águas residuais tratadas na Índia são de apenas 37% (Shakeel A. Khan, 2018). Os países de baixa renda (menos desenvolvidos) contribuem com a maior proporção de sua água usada não tratada devido à falta de infraestrutura, capacidade técnica e institucional e financiamento. Globalmente, a redução

de águas residuais não tratadas, a reciclagem e a reutilização segura são altamente necessárias (Van Gerpen, 2005). Com as tendências atuais, espera-se uma produção global de 2,2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) até 2025. Em particular, a gestão da fração orgânica (RSU), que representa cerca de 40 % do total de resíduos urbanos, tornou-se uma prioridade para a UE, com protocolos específicos destinadas a reduzir a deposição em aterros a um mínimo. Se não for gerenciado adequadamente, o RSU pode causar sérios danos ao meio ambiente, contaminando a água e os solos (Elena Barbera, 2022).

Os três tipos de sistemas de tratamento de efluentes ou águas poluídas são: físico, químico e biológico (Fig. 1). Dependendo do tipo de poluente(s), extensão da poluição e volume a ser tratado, podem ser utilizados em conjunto ou separadamente. A Organização Mundial da Saúde (OMS) elaborou as diretrizes para melhorar os regimes de gestão de WW e mitigar os riscos à saúde em todas as fases do tratamento (OMS, 2019). Dependendo da composição do efluente, certas condições como pH, alta concentração de certos contaminantes e temperatura, inviabilizam o tratamento biológico inicialmente, levando-se a necessidade dos tratamentos físicos e/ou químicos primeiro. Após os processos convencionais de tratamento de águas residuais, os resíduos gerados devem ser enviados para tratamento e descarte, aumentando ainda mais os custos operacionais. Em comparação com as tecnologias de tratamento físico e químico de águas residuais, os tratamentos à base de microalgas (ficorremediação) durante o processo de tratamento secundário de águas residuais são mais eficientes, seguros e baratos.

A história do interesse comercial na utilização de culturas de algas remonta a cerca de 75 anos com a sua aplicação a efluentes utilizando diferentes cepas de microalgas como *Chlorella* e *Dunaliella* (Rajaa Kholssi, 2021). O nome dado à tecnologia verde que combina as ações das plantas e seus grupos microbianos associados para remover e transferir os compostos tóxicos em águas superficiais, subterrâneas e solo é ficorremediação. As plantas aquáticas são amplamente utilizadas para a remediação de rios contaminados, lagos eutróficos e outros corpos d'água (Shahabaldin Rezanian, 2021).

Além disso, o tratamento de efluentes gera resíduos que podem ser convertidos em bioprodutos e bioenergia por diversas rotas de uso. Portanto, gerenciar esses resíduos é uma etapa crucial e uma oportunidade para recuperar recursos com diversas aplicações. Águas residuais podem ser usadas de forma confiável para irrigação na agricultura.

Assim, é necessário identificar técnicas de tratamento de efluentes ambientalmente sustentáveis e econômicas que exijam o mínimo de infraestrutura e insumos.

Microalgas cultivadas em águas residuais podem integrar nutrientes cruciais, por exemplo, N, P, K, Mg, Zn e Fe. Os propósitos essenciais da gestão de águas residuais são eliminar a maior quantidade de demanda química de oxigênio (DQO), fósforo (P), nitrogênio (N) e outros materiais orgânicos (Nzayisenga, 2020).

O fósforo disponível nas águas residuais é precipitado, mas muitas vezes em uma forma que não pode ser reutilizada na agricultura. Como alternativa, o potencial das microalgas para acumular grandes quantidades de fósforo pode fechar o ciclo do fósforo de volta à agricultura. Isso ocorre porque as algas podem adquirir e armazenar fósforo por meio da absorção e a biomassa de algas enriquecida com fósforo pode ser aplicada de volta como fertilizante ao solo. A absorção passiva, que é controlada por variáveis ambientais, como teor de fosfato, intensidade de luz e temperatura, permite que as microalgas absorvam fosfato na forma de polifosfatos nas lagoas de cultivo. No entanto, a técnica de absorção passiva precisa de mais investigação para tratar águas residuais ricas em fósforo (Ashfaq Ahmad, 2021).

Microalgas eucarióticas assimilam nitrogênio de amônia, nitrato e nitrito, que entram na célula por transporte ativo através da membrana plasmática. No entanto, a absorção só é possível após duas reduções mediadas por duas enzimas distintas, nomeadamente nitrato redutase e nitrito redutase. O nitrogênio pode ser encontrado no ambiente em uma variedade de formas, incluindo nitrato, nitrito, ácido nítrico, amônia, amônia, nitrogênio molecular, óxido nitroso, óxido nítrico e dióxido de nitrogênio (Ashfaq Ahmad, 2021).

2.3.4.1 Captação de CO₂

Microalgas são microrganismos fotossintetizantes e em vários estudos que os seus sistemas de cultivo podem absorver até 200 vezes mais CO₂ do que as árvores (Melis, 2009). Vários programas de triagem em diferentes locais do mundo estudaram espécies de microalgas para identificar as cepas mais adequadas. No entanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa se concentrou em um pequeno número de espécies de microalgas de crescimento rápido que acumulam quantidades substanciais de componentes desejáveis (Mobin, 2017).

2.3.4.2 Efluentes

2.3.4.2.1 Urbanos

Os efluentes urbanos são principalmente gerados nas habitações, sendo que a maior parte da sua composição é formada por dejetos humanos e resíduos alimentares. As propriedades físico-químicas das águas residuais urbanas incluem pH, DQO, DBO, nitrogênio total, fosfato, potássio, metais e carga microbiana total. Pela baixa presença de substâncias tóxicas e metais pesados, ele mostrou-se como o melhor efluente para o cultivo de microalgas. Efluentes municipais foram usados como meio de crescimento para culturas de *S. obliquus* e *Desmodesmus* sp. com mais de 75% de nitrogênio e fósforo eliminados (Nzayisenga, 2020).

2.3.4.2.2 Industriais

As microalgas são muito eficientes na eliminação de poluentes tóxicos de efluentes industriais, pois possuem boa capacidade de biossorção, biodegradação e transformação. Elas já foram adotadas no tratamento de vários resíduos industriais, exemplos de uso são nas indústrias petroquímica, têxtil, laticínios, farmacêutica, sucroalcooleira, entre outros.

Têxtil

As águas residuais da indústria têxtil contêm inúmeros poluentes, especialmente corantes, que podem ter impactos negativos se não forem devidamente tratados, como efeitos adversos na estética, eutrofização, atividade fotossintética reduzida e toxinas bioacumuladas nos aquíferos. Microalgas e carvão ativado comercial foram usados para remover o corante têxtil Reactive Red120 (RR-120) de efluentes aquosos. *Spirulina platensis* removeu até 94-99% em comparação com 94-98% do mesmo tratamento com carvão ativado (Cardoso, 2012).

Laticínios

A indústria de laticínios está em operação em todo o mundo. Nesse setor, são gerados entre 0,2 e 10 L de efluente por litro de leite processado e devem ser tratados antes de serem descartados. Os resíduos orgânicos presentes no efluente de laticínios são considerados prejudiciais ao meio ambiente devido à alta demanda química de oxigênio

(DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) resultantes e aos problemas associados à rápida degradação (Jorge Alberto Vieira, 2021).

O tratamento com microalgas deste efluente garantiu a taxa máxima de remoção de DQO de 95% e a produção de biomassa algal em um curto período de tempo. Além de reduzir a diversidade das populações bacterianas nas águas residuais, foi alcançada a produção máxima de biomassa. Microalgas removeram até 89,7% DQO após 8 dias de cultivo em águas residuárias de fazendas leiteiras sem esterilização. A eliminação completa do nitrogênio total do nitrito e da amônia foi alcançada após 4 e 6 dias de cultivo. O nitrogênio amoniacal foi relatado como a fonte de nitrogênio preferida para microalgas porque é digerido diretamente e requer muito pouca energia para assimilação (Ding et al., 2015). Durante esse processo de integração entre a produção de microalgas e a indústria de laticínios, foi relatado que para cada tonelada de biomassa de *C. vulgaris* produzida, aproximadamente 102 toneladas de efluente líquido do laticínio podem ser tratadas com remoção simultânea de nitrogênio e fósforo (Rozi Sharma, 2021).

Farmacêutico

Muitos compostos químicos perigosos, resíduos de antibióticos e sais inorgânicos estão presentes nos efluentes da indústria farmacêutica e representam uma ameaça ao meio ambiente e a vida humana. Além disso, a tecnologia baseada em microalgas foi desenvolvida para tratar águas residuais contendo produtos farmacêuticos e de higiene pessoal (PPCPs). Vários estudos relataram que microalgas removem eficientemente PPCPs, como antibióticos, de águas residuais (Bhupendra Koul, 2021).

Sucroalcooleira

A vinhaça da cana-de-açúcar, também conhecida como vinhoto, é obtida como produto de fundo das colunas de destilação que separam o bioetanol de primeira (1G) ou segunda (2G) geração após processos fermentativos. É frequentemente usado para fertirrigação em canaviais, apesar das preocupações com seu impacto ambiental tóxico e forte odor desagradável (Ashfaq Ahmad, 2021). Nesse sentido, tratamentos convencionais de efluentes têm sido aplicados ao manejo da vinhaça, como bioprocessamento, processos oxidativos avançados, digestão anaeróbia e processos de base química (Rodrigues Reis e Hu, 2017). O cultivo de microalgas também pode ser considerado um processo de

biorremediação, apresentando um aumento na produtividade de biomassa associado à remoção de nutrientes (Gabriela F. Ferreira, 2021).

2.3.4.2.3 Agrícolas

O efluente da indústria de alimentos mostrou ser o cenário mais promissor para a recuperação de bioprodutos a partir de microalgas no tratamento de efluentes, devido à sua melhor qualidade em comparação com os efluentes urbanos.

As indústrias agroindustriais e de processamento de alimentos produzem enormes quantidades de efluentes, pois resíduos e subprodutos são inevitáveis em qualquer setor produtivo. Quando as águas residuais são lançadas em corpos d'água sem serem tratadas para remover nutrientes e carbono orgânico, isso leva à eutrofização, que promove o crescimento de espécies indesejáveis, como macrófitas aquáticas e cianobactérias produtoras de toxinas (Priyanka Gehlot, 2021).

A digestão anaeróbica é comumente utilizada como primeira etapa no tratamento precoce de efluentes, pois produz uma grande quantidade de biogás que pode ser utilizado como fonte de bioenergia, reduzindo custos operacionais e agregando valor ao processo (Ahmad et al., 2016).

A cultura de algas em meio de efluentes de óleo de fábrica de palma (POME) melhorou a remoção de COD (95%), BOD (97%), TOC (75%), TN (91%), e ácidos graxos (95%) (Ashfaq Ahmad, 2021). Outro estudo relatou a maior remoção de COD (95–98%), BOD (90–98%), TOC (80–86%) e TN (80%) com *N. oculata* e *Chlorella* sp. em comparação com sem envolver microalgas (Ahmad et al., 2015).

Esses estudos demonstraram uma remoção significativa de DQO e componentes químicos como nitrato, fosfato, sulfato, cloreto, cálcio, potássio, magnésio, sódio, fósforo, amônia e carbono orgânico ao produzir biomassa de microalgas.

2.3.4.2.4 Pecuária

Pesquisas mostram o tratamento de resíduos da pecuária com microalgas principalmente na suinocultura. O efluente suíno pode conter contaminantes biológicos, sendo que estudos sugeriram o cultivo de *Scenedesmus* spp. como forma de remover a *Salmonella*

enterica serovar Typhimurium dos resíduos da suinocultura e assim reduzir as epidemias de Salmonelose causada pela pecuária (Francisca, 2018).

2.3.4.2.5 Metais pesados - rizofiltração

Os metais pesados são um dos componentes mais comuns das águas residuais que produzem toxicidade no ambiente aquático e danos aos animais e plantas.

Devido à sua resistência à decomposição, os metais pesados entram na cadeia alimentar e representam um risco para a saúde de plantas e animais superiores, incluindo humanos.

A rizofiltração com algas é uma técnica na qual as algas concentram, absorvem e precipitam metais em sua biomassa a partir de água contaminada. Vários contaminantes inorgânicos e orgânicos (Ni, Zn, Pb, Cr, Cu) são extraídos por rizofiltração. Algas marinhas e plantas terrestres são amplamente utilizadas para rizofiltração porque possuem sistemas radiculares de crescimento rápido. A rizofiltração foi documentada em algas unicelulares, algas verde-azuladas (*Cladophora* sp., *Phormidium* sp. etc.), algas marinhas e em plantas como tabaco, espinafre e mostarda (Ashfaq Ahmad, 2021).

De fato, as microalgas têm sido identificadas como bioSORVENTES que exibem maior potencial do que outros tipos de sorventes. As microalgas possuem macromoléculas multifuncionais que incluem lipídios, proteínas e carboidratos que possuem vários grupos funcionais carregados negativamente em sua superfície, como amino, hidroxila, carboxila, sulfidril, sulfato, fosfato, fenol, etc. Esses grupos carregados negativamente permitem que os íons do ambiente circundante se prendam, tornando a camada externa da parede celular o participante inicial na remoção de HMs (Bhupendra Koul, 2021). Portanto, é importante entender a estrutura, composição e características da parede celular para a bioSORÇÃO de metais pesados.

2.3.5 Digestão e Codigestão anaeróbia

Os sistemas de tratamento de águas residuais baseados na combinação de microalgas e bactérias têm ganho interesse nos últimos anos, entre outras razões devido ao potencial de produção de produtos de valor acrescentado a partir da biomassa. Em lagoas de alta taxa de algas, os poluentes são removidos das águas residuais por uma simbiose algas-bactérias na qual bactérias heterotróficas oxidam contaminantes orgânicos usando o

oxigênio liberado por microalgas que absorvem nutrientes (principalmente N e P) e capturam CO₂ da respiração bacteriana (Ana Álvarez-González, 2022).

A Comissão Europeia considerou a digestão anaeróbica de resíduos orgânicos entre as tecnologias de maior eficiência energética para aproveitar o potencial energético dos resíduos biológicos. Acoplar a produção de microalgas ao tratamento de águas residuais para produção de biocombustíveis por meio de digestão anaeróbica ou codigestão com outros substratos é técnica e economicamente viável (Charles Oluwaseun, 2022).

A digestão anaeróbia (DA) tornou-se uma tecnologia consolidada para o tratamento de resíduos orgânicos: o número de plantas DA alimentadas com a fração orgânica do lixo municipal na Europa aumentou de 244 em 2010 para 688 em 2016 (Shakeel A. Khan, 2018). Esta tecnologia é particularmente apelativa por cumprir uma perspectiva de economia circular. De fato, através da degradação anaeróbica, os resíduos são convertidos em energia renovável na forma de biogás, que pode ser usado para a produção de energia elétrica ou convertido para biometano para transporte ou adição na rede de gás natural.

No entanto, antes do tratamento final, o alto teor de nutrientes deste fluxo pode ser explorado e valorizado para produzir biomassa, acoplando o cultivo de microalgas ao processo DA. Assim, o cultivo de microalgas concomitante a DA surge como uma estratégia interessante para recuperar nutrientes deste fluxo de resíduos, ao mesmo tempo em que produz uma biomassa valiosa, expandindo a característica de economia circular de todo o processo.

Embora o digerido possa ser efetivamente reutilizado na fazenda como fertilizante quando a alimentação DA é feita de esterco animal e/ou resíduos agrícolas, regras muito mais rígidas se aplicam ao digerido derivado de OFMSW, que geralmente requer pré-tratamento e estabilização antes de poder ser usado em aplicações de terra.

2.4 Estudos ambientais

2.4.1 Bioeconomia

Bioeconomia é a ciência que estuda os sistemas biológicos e recursos naturais aliados à utilização de novas tecnologias com propósitos de criar produtos e serviços mais sustentáveis.

Em 2015, a Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU) estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (SDGs, do inglês Sustainable Development Goals) a serem alcançados até 2030. Esses objetivos destacam os principais objetivos que devem ser alcançados. Cada alvo se concentra em uma perspectiva única, crucial para atingir esses objetivos. Questões sociais, políticas e econômicas são abordadas para revisar de forma abrangente as principais questões que combatem as mudanças climáticas e criam indústrias, empregos e comunidades sustentáveis e ecologicamente corretas. Verificou-se que as microalgas contribuem para todos os 17^o SDGs, onde contribuem diretamente para o 9^o SDGs e indiretamente contribuem para os restantes. A principal contribuição das microalgas é clara no SDG-6 “Água limpa e saneamento”, SDG-7 “Energia acessível e limpa” e SDG-13 “Ação climática”. Além disso, verificou-se que as Microalgas têm uma contribuição significativa para a bioeconomia (A. G. Olabi, 2022).

A capacidade de produzir vários produtos de valor agregado a partir de biorrefinarias e tratar efluentes dos mais diversos inserem a produção de microalgas na bioeconomia. O seu cultivo a partir de efluentes minimiza os custos de produção tanto de microalgas quanto do tratamento de resíduos. Foi relatado por pesquisadores que as microalgas têm duas vantagens significativas sobre as plantas em relação à geração de biomassa. Primeiro, o rendimento de biomassa foi significativamente maior para microalgas; com produtividades projetadas em cerca de 70 toneladas por hectare ao ano de peso seco. Em segundo lugar, o cultivo de microalgas não requer terra arável ou água doce (Shakeel A. Khan, 2018). Quando comparado aos fertilizantes sintéticos, os biofertilizantes microalgais não causam perda de biodiversidade, nem acumulam resíduos químicos nas plantações e produtos alimentícios e, portanto, quando consumidos, não causam impactos prejudiciais à saúde (Bunushree Behera, 2021).

A agricultura tradicional e a pecuária podem contribuir para a degradação da fertilidade do solo e aumento da poluição do meio ambiente, principalmente do ar e da água. Elas contribuem para as mudanças climáticas tanto quanto sofrem suas consequências. As emissões de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), N₂O e óxidos de nitrogênio (NO_x), que são gases potenciais para o aquecimento global, são geradas por diferentes práticas agrícolas e métodos de manejo pecuário (Flavio Martini, 2021).

2.4.2 Economia Circular

Economia circular é definida como um sistema onde os resíduos de uma indústria são consumidos por outra como matéria-prima sucessivamente fechando um ciclo. Um simples exemplo é o tratamento de vinhaça (ou vinhoto) com microalgas na indústria sucroalcooleira, neste ciclo a vinhaça gerada na produção de álcool a partir de cana-de-açúcar é tratada com microalgas, com uma menor taxa de DBO e menor teor de nitrogênio o efluente tratado de vinhaça pode ser reutilizado na fertirrigação para cultivo de cana-de-açúcar, que após a colheita é novamente utilizada para produção de açúcar e etanol gerando-se vinhaça novamente e reiniciando o ciclo.

Portanto, os sistemas de tratamento de águas residuais com microalgas são uma solução promissora não apenas para o tratamento de águas residuais, mas também para impulsionar a economia circular no setor de biofertilizantes à base de microalgas.

2.4.3 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

De acordo com a ISO 14040 (2006), a ACV é uma metodologia utilizada para avaliar os aspectos ambientais associados a um produto, sendo realizada por meio da coleta e quantificação da energia e materiais necessários à produção, insumos do sistema e resíduos e emissões liberados para o ambiente. Também apoia as tomadas de decisão da indústria, organizações governamentais ou não governamentais, permitindo-lhes selecionar indicadores relevantes para o desempenho ambiental, bem como o marketing, atribuindo ao produto rótulo ecológico ou declaração ambiental. Os resultados dependem das definições dos limites do sistema, da base de dados utilizada para os processos, da eficiência dos processos e das unidades funcionais (Mauro Henrique Batalha, 2018).

No caso do estudo de fertilizantes ele permite a comparação de todos os efeitos econômicos e ambientais da produção e adoção de um fertilizante ou outro. O processo de extração ou produção da matéria-prima, o seu processamento, a produção do fertilizante, o uso na agricultura e todas as etapas de transporte tem efeitos energéticos e ambientais. Fatores como a emissão de CO₂ e emissão de poluentes nas fontes de água marinha, doce e subterrânea, assim como no ar e solo em todas as etapas são computados permitindo comparar o impacto de cada fertilizante usado. A recuperação de bioprodutos de sistemas de tratamento de efluentes com microalgas pode reduzir os impactos ambientais em até 5 vezes em comparação com um sistema convencional usando um meio

de crescimento padrão. Isso se deve principalmente ao menor consumo de produtos químicos para o cultivo de microalgas.

3. Metodologia para o estudo do uso de microalgas na agricultura

A pesquisa do mapeamento tecnológico foi realizada buscando-se artigos e patentes em sites específicos que apresentavam em sua estrutura diretórios de grupos de pesquisa e bases de dados específicas referentes ao tema desta tese. Tais sites e a metodologia adotada para cada um deles será mostrada em detalhes separadamente a seguir, as suas ferramentas, resultados, origem, fontes e demais informações pertinentes à pesquisa estão detalhadas. A razão pela qual estes diretórios e bases foram escolhidos são devido ao fato de que apresentam um largo banco de documentos, possibilitando a análise de novas tecnologias para a produção e aplicação de microalgas na agricultura com foco em biofertilizantes.

3.1 Mapeamento de artigos

3.1.1 Diretório dos grupos de pesquisa no Brasil - CNPq

O site da CNPq possui ferramentas de busca que possibilitam encontrar os grupos de pesquisa científica e tecnológica presentes no país para uma determinada linha de estudo.

Os grupos de pesquisa inventariados estão localizados, principalmente, em universidades, instituições isoladas de ensino superior com cursos de pós-graduação *stricto sensu*, institutos de pesquisa científica e institutos tecnológicos.

A intenção do uso desta base de dados do CNPq é para identificar os grupos de pesquisa, e quais linhas de pesquisa relacionadas ao uso de microalgas na agricultura com foco em biofertilizantes eles desenvolvem ou desenvolveram, e a quais instituições estão vinculados.

Para começar a pesquisa, na página inicial em "Consulta parametrizada", os campos foram preenchidos da seguinte forma:

Base corrente> Censo:Atual > Termo de busca: Qualquer palavra> Consultar por: Linha de Pesquisa> Aplicar a busca nos campos: Nome do grupo, nome da linha de pesquisa,

palavra-chave da linha de pesquisa, e objetivo da linha de pesquisa. Foram realizadas buscas com as seguintes palavras-chaves: biofertilizante microalga; bioestimulante microalga; fertilizante microalga. A consulta por meio de linhas de pesquisa em vez de grupo de pesquisa é mais vantajosa, pois um dado grupo de pesquisa pode não se focar somente em microalgas na agricultura, ou biofertilizantes de microalgas, mas dentre as várias linhas de pesquisa adotadas, ter ao menos uma que aborda o tema pretendido nesta tese.

Em seguida foi realizada uma nova busca com as mesmas palavras chaves, só que no campo "Termo de Busca" mudou-se para "Qualquer palavra". Isto é importante para se verificar se os operadores booleanos estão funcionando adequadamente, caso estejam os resultados irão mostrar o conjunto união de todos os resultados para cada palavra-chave individualmente.

Por fim, tendo todos as linhas de pesquisa listadas e seus respectivos grupos de pesquisa, as demais linhas de pesquisa de cada grupo foram verificadas para se certificar de que outras linhas de pesquisas relacionadas ao tema não foram fornecidas nos resultados, isto foi feito com a leitura do resumo de atividades das linhas de pesquisa.

Tabela 1: Palavras-chaves utilizadas na busca de linhas de pesquisa do diretório do CNPq

| Termo de busca |
|---------------------------|
| Bioestimulante microalga |
| Biofertilizante microalga |
| Agricultura microalga |

A busca na base de dados do CNPq foi realizada entre 05 de dezembro a 09 de dezembro de 2022, nelas correspondem todos os resultados do primeiro censo realizado em 1993 até o último de 2016.

3.1.2 Base do Science Direct

A base do Science Direct é um dos maiores bancos de dados do mundo, apresentando artigos referentes às pesquisas acadêmicas de alta relevância. Para se realizar a consulta, as mesmas palavras-chaves que foram utilizadas para o diretório de pesquisas do CNPq, mas desta vez em inglês, por se tratar de uma base internacional.

Na ferramenta de pesquisa, no campo "Title, abstract, keywords" foram adicionadas as palavra-chaves que deveriam aparecer no título, resumo ou palavras-chaves do artigo, os termos desta vez usados foram "biostimulant microalgae" e "biofertilizer microalgae".

A pesquisa foi realizada entre os dias 26 de outubro de 2022 e 05 de novembro de 2022. A base de dados possui artigos datados desde a sua criação em 2017.

Tabela 2: Palavras-chaves utilizadas na busca de artigos utilizando a base de dados do Science Direct

| Termos em português | Palavra - chave utilizada na busca |
|----------------------------|---|
| Bioestimulante microalga | <i>"biostimulant microalgae"</i> |
| Biofertilizante microalga | <i>"biofertilizer microalgae"</i> |

3.2 Mapeamento de Patentes

3.2.1 Base de busca de patentes

Para realizar a pesquisa por patentes, foram selecionadas duas bases de busca: a base de patentes brasileiras do Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) e a base européia *European Patent Office* (Espacenet),).

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) é uma autarquia federal brasileira, criada em 1970, vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). Tem por finalidade principal, segundo a Lei 9.279/96 (Lei da Propriedade Industrial), executar, no âmbito nacional, as normas que regulam a

Propriedade Industrial, tendo em vista a sua função social, econômica, jurídica e técnica. Nele dentre várias outras atividades o registro de patentes é possível, permitindo-se assim o direito exclusivo de explorar uma dada criação, contanto que a sua inovação tecnológica seja confirmada.

Para realizar a pesquisa, na página de "Busca de patentes", os campos foram preenchidos da seguinte forma:

Contenha: Todas as palavras > "palavras-chaves" > no: Resumo , sendo que as palavras chaves foram "*fertilizante* microalg*" e "bioestimulante* microalg*", o uso do asterisco permite que qualquer completção do radical apareça nos resultados de pesquisa, por exemplo: para microalg* resultados aparecendo microalga, microalgas ou microalgácea podem aparecer, o radical no prefixo permite que para a palavra-chave *fertilizante* apareçam resultados com fertilizante, biofertilizante e seus respectivos plurais.

A base Espacenet além de ser muito completa, pois contém patentes de todo mundo não sendo restrita apenas ao continente europeu, possui ferramentas que facilitam as pesquisas.

A base de patentes do INPI foi consultada de 10 de novembro de 2022 a 26 de outubro de 2022, e a do Espacenet de 05 de novembro de 2022 a 11 de novembro de 2022, sendo que na base do INPI tem patentes desde 1970 até hoje e a do Espacenet tem 140 milhões de patentes datadas desde 1782 até hoje.

4 Resultados e discussão

4.1 Resultados da busca de artigos no Diretório dos grupos de pesquisa no Brasil - CNPq

Com a metodologia adotada, 16 linhas de pesquisa na área foram encontradas, sendo que elas pertencem a 9 grupos de pesquisa diferentes. Na tabela a seguir é possível ver cada grupo de pesquisa, suas linhas de pesquisa relacionadas ao tema, à qual instituição pertence e a data de criação do grupo de pesquisa.

Tabela 3: Grupos de pesquisa do diretório do CNPq

| Grupo de pesquisa | Linha de pesquisa | Data de registro | Instituição |
|--|--|-------------------------|--------------------------------------|
| Biomoléculas | Prospecção e análise de moléculas bioativas e com valor nutricional | 2016 | UNESP |
| EMBRAPA | Adubação orgânica <i>Manejo orgânico do solo</i> | 1993 | EMBRAPA |
| Estudos sobre efeito de alterações em atributos físicos, químicos e biológicos de solos na produção vegetal. | <i>Fertilidade do solo e nutrição de plantas</i> | 2012 | Instituto Federal Goiano - IF Goiano |
| Fermentação em Estado Sólido | <i>Aproveitamento e Tratamento de resíduos sólidos</i> <i>Produção de Spirulina por FES</i> | 2002 | UNG |
| Grupo de Manejo da Irrigação e da Quimigação | <i>Biofertilizante e Reuso da Água</i> | 2006 | UFC |
| Grupo de pesquisa em Bioenergia a partir de Microalgas | <i>Aplicação de biofertilizante de microalgas no solo</i> <i>Avaliação do ciclo de vida</i> | 2009 | UFV |

*Hidroponia a partir de águas
residuárias*

| | | | |
|--|---|------|-------|
| Sistemática e Ecologia de Criptógamas e Fungos | <i>Biotecnologia de micro e macroalgas</i> | 2000 | UEFS |
| Sustentabilidade na Agricultura | <i>Potencialidades biotecnológicas de microalgas na Sustentabilidade da Agricultura</i> | 2007 | UEMS |
| Utilização de microalgas no pós-tratamento de efluentes | <i>Recuperação de nutrientes utilizando microalgas</i> | 2014 | UNESP |

Separação de microalgas

Uso de microalgas como fertilizantes

A metodologia adotada mostrou-se satisfatória, pois alguns resultados não teriam sido obtidos caso fosse utilizada, o resultado de "Hidroponia a partir de águas residuárias" não apareceria apesar de estar ligado ao tema, nele águas residuárias foram tratadas com microalgas, que após o tratamento foram destinadas ao cultivo de plantas, mas por não se tratar necessariamente de um biofertilizante microalgal, mas sim uma corrente líquida carregada de nutrientes tratada a partir de microalgas, não seria adicionada aos resultados, apesar de estar relacionada ao tema.

Quando analisado a quais estados essas instituições pertencem, vemos que somente 7 estados tem grupos de pesquisa que trabalham ou já trabalharam na área de biofertilização microalgal, vale-se ressaltar que a EMBRAPA tem unidades em todo o país, sendo uma instituição de caráter nacional, diferente das demais.

Portanto, apesar do agronegócio ser uma atividade de grande impacto na economia nacional, poucas linhas de pesquisa na área de fertilização a partir de microalgas foram criadas no país, mesmo sendo uma tecnologia alternativa de alto potencial para o Brasil.

4.2 Resultados da busca por artigos na base do Science Direct

A pesquisa realizada na base do Science Direct apresentou um número relevante de resultados sobre estudos e tecnologias do uso de microalgas na agricultura. Na tabela 4 a seguir é mostrado o número de artigos por conjunto de palavras-chaves utilizadas nos termos de busca.

Tabela 4: Tópicos abordados nos artigos da base do Science Direct

| Palavra chave | Número de artigos |
|--------------------------|--------------------------|
| Bioestimulant microalgae | 34 |
| Biofertilizer microalgae | 93 |
| Agriculture microalgae | 435 |

O número de artigos encontrados superou 500 resultados. Isto é devido principalmente aos resultados contendo os termos "agriculture" e "microalgae" que produziu 435 resultados, inviabilizando a análise de todos, usar "agricultura" como palavra-chave levou a este elevado número por se tratar de um termo muito amplo e conseqüentemente presente em muitas pesquisas, que poderiam não estar relacionadas com o objetivo principal do trabalho, que é a fertilização do solo por microalgas. Portanto somente os resultados de busca para as palavras-chaves "biofertilizer" e "microalgae" produzindo 93 resultados e "biostimulant" e "microalgae" com 34 resultados foram analisados, sendo que 6 resultados estavam presentes em ambas as buscas.

Os artigos foram então analisados e aqueles que não estavam relacionados ao tema do trabalho foram excluídos da seleção, isto foi feito a partir da leitura dos seus títulos e

resumos. Feito isto, os artigos que correspondiam à busca deste trabalho foram adicionados ao Anexo A, ao final deste trabalho com um total de 100 documentos.

Uma vez que os artigos relacionados à pesquisa foram definidos, eles passaram a ser divididos em uma série de tópicos e subtópicos quando pertinente. A lista com todos os tópicos definidos pode ser vista na Tabela 5, assim como a frequência que foram abordados nas pesquisas. Vale-se ressaltar que vários artigos abordam mais de um tópico presentes na nossa seleção, como em alguns casos, o uso de microalgas como forma de biorremediação dos mais diversos tipos de efluentes e uma vez sob a posse da biomassa algal produzida, elas são destinadas a outra área como a direta aplicação como biofertilizante e biorrefinarias para geração de produtos de alto valor agregado. Quanto aos subtópicos eles foram definidos pelo fato de alguns temas serem direcionados a uma área específica, em biorremediação alguns estudos focam em um determinado grupo de efluentes, como os urbanos, industriais ou agrícolas, ou sob o uso combinado de técnicas como a codigestão anaeróbia que neste trabalho consiste na combinação de microalgas e bactérias para tratar o efluente gerado.

Tabela 5: Tópicos abordados nos artigos da base do Science Direct

| Tópico | Número |
|-----------------------------|---------------|
| Bioestimulantes | 29 |
| Biofertilizantes | 49 |
| Biodefensivo | 7 |
| Biorremediação | 61 |
| Biorrefinaria e bioprodutos | 42 |
| Técnicas de aplicação | 13 |

| | |
|----------------------|----|
| Condições de plantio | 33 |
| Estudo ambiental | 21 |
| Microalgas estudadas | 40 |
| Nutrientes | 4 |

Apesar de serem termos similares e muitas vezes serem usados como sinônimos biofertilizantes e bioestimulantes não são a mesma coisa. Enquanto o primeiro trata-se de qualquer substância capaz de prover nutrientes para o funcionamento e desenvolvimento de um organismo, e no caso deste trabalho plantas, pois estamos tratando de agricultura, não é necessariamente a função do segundo termo. Bioestimulantes são substâncias ou microrganismos capazes de promover o crescimento das plantas, captação de nutrientes pelo solo e tolerância ao estresse abiótico, independente do teor de nutrientes, vale-se ressaltar que certos nutrientes em níveis muito altos são tóxicos para as plantas, como visto em solos de alta salinidade, mas a capacidade de aumentar a tolerância ao estresse abiótico permite que os bioestimulantes promovam o cultivo de plantas em condições antes adversas. Portanto, alguns artigos focam na aplicação de microalgas ou seus derivados, ora pela sua capacidade nutricional, ora pela sua ação como estimulante, eles foram colocados como tópicos distintos na etapa de classificação dos artigos.

Outro fato relevante para o entendimento dos resultados desta pesquisa é o porquê em dados momentos os termos biofertilizantes e bioestimulantes aparecem como tópicos e em outros como subtópicos de biorrefinaria e bioprodutos. Alguns artigos estudam diretamente a produção e/ou aplicação de biofertilizantes e bioestimulantes microalgais, a variação dos nutrientes no solo, o consumo e produção cíclicos configurando a economia circular, as suas vantagens e desvantagens frente os outros tipos de fertilizantes, entre as demais categorias de pesquisa. Já nos artigos que tratam de biorrefinaria e bioprodutos, discutem-se toda a gama de produtos de alto valor agregado passíveis de serem produzidos, portanto quando estes termos aparecem como subtópicos, é pelo fato de serem abordados e discutidos no artigo, mas não como foco principal. Todos os artigos abordaram biofertilizantes e/ou bioestimulantes, em 76 deles biofertilizantes microalgais

foram discutidos sendo que 49 vezes ele foi o foco principal do artigo, já bioestimulantes teve foco 29 vezes das 35 em que foi abordado.

As microalgas demandam uma grande quantidade de nutrientes para serem produzidas, o que por muito tempo desestimulou a sua produção em larga escala, mas a sua capacidade de tratar efluentes mudou este paradigma. Na maior parte dos artigos, 61 deles, é abordada a produção de microalgas via biorremediação, pelo fato das alternativas de tratamento de efluentes mais comuns terem uma série de desvantagens a biorremediação foi apresentada como uma solução viável. Nos tratamentos físicos os efluentes são tratados principalmente via precipitação e filtração e as frações sólidas obtidas têm que ser armazenadas em aterros, necessitando da proteção do solo para se prevenir a contaminação por lixiviação. Já os tratamentos químicos dependem de substâncias que para a sua própria produção geram diversos danos ao meio ambiente como eutrofização e ecotoxicidade do solo e fontes d'água. Os tratamentos biológicos via digestão anaeróbia geram poucos produtos de valor agregado, basicamente apenas biogás, que pode ser usado para gerar eletricidade, ou concentrado e purificado para ser canalizado e aplicado em outros locais, além de se gerar grande quantidade de CO₂. As microalgas são uma ótima alternativa para se combinar ou substituir todos esses processos, com uma grande variedade delas existentes mais de 50 espécies já foram catalogadas como biorremediadores, a sua composição permite a produção de vários produtos de valor agregado e ainda são capazes de absorver CO₂.

Neste trabalho foi possível identificar a biorremediação de vários tipos de efluentes por microalgas. A subdivisão subcategoriza os tratamentos como urbano, industrial, agrícola, pecuária e metais pesados, assim como outras técnicas de biorremediação como a digestão anaeróbia e a associação dela com as microalgas chamada de codigestão anaeróbia. Os efluentes urbanos, ou simplesmente esgoto doméstico, são compostos principalmente de dejetos humanos, fezes e urina, e restos de alimentos, logo são ricos em macro e micronutrientes, mas ecotóxicos devido as suas grandes concentrações, as microalgas pelas suas grandes tolerâncias a essas altas concentrações mostram-se uma excelente alternativa. No caso dos industriais a maioria dos casos de estudo foram para a indústria têxtil com poluentes ricos em carbono, nitrogênio e enxofre, e de alimentos processados como laticínios, vinhos e sucoalcooleiro, a presença de microrganismos resistentes provenientes da fermentação mostram-se um desafio para os tratamentos químicos e

físicos. Os efluentes agrícolas são os mais bem inseridos no conceito de economia circular, neste sistema integrado as plantas são comumente fertilizadas com biofertilizantes microalgais, os resíduos e efluentes gerados são tratados com microalgas, e pôr fim a biomassa produzida é processada e (re)utilizada na fertilização das plantas, fechando o ciclo. Ainda no ramo de alimentos temos os efluentes da pecuária, a maior parte dos estudos focou na suinocultura, mas também na criação de gado e um caso de avicultura, assim como nos efluentes urbanos, temos um índice ainda maior de dejetos biológicos, portanto ricos em carbono, nitrogênio e enxofre, o processamento da carne gera ossos, gordura e sebo, que quando não aproveitados podem ser tratados combinando microalgas e bactérias na forma da codigestão anaeróbia. E por último as microalgas são capazes de absorver metais pesados, isto permite a correção do solo, em geral altamente salinos ou secos, permitindo assim outras práticas como a agropecuária.

Tabela 6: Subtópicos de Biorremediação

| Biorremediação | 61 |
|-----------------------|-----------|
| Urbano | 14 |
| Industrial | 3 |
| Agrícola | 12 |
| Pecuária | 9 |
| Metais pesados | 1 |
| Digestão anaeróbia | 7 |
| Codigestão anaeróbia | 6 |

A maior parte dos estudos de biorremediação com microalgas foi realizada na Índia, sendo o segundo país mais populoso do mundo com um total de 1,28 bilhões de habitantes e também um dos mais poluentes, a biorremediação mostra-se uma boa forma de tratamento pela sua versatilidade e baixo custo, sendo inclusive passível de gerar produtos de alto valor agregado. A maior parte dos estudos se concentrou na biorremediação da produção agrícola de arroz como alternativa para se gerar biofertilizantes e bioenergia, em seguida os estudos foram mais frequentes para o esgoto doméstico, que por se tratar de um país com alta pobreza e grande número de habitantes em situação periférica, permite uma mais rápida implementação pela sua praticidade e baixo custo, por último ainda tivemos pesquisas para efluentes industriais. O segundo maior número de estudos na área de biorremediação veio do Brasil, se concentrando na UFV e UFRGS, instituições pertencentes a dois dos estados mais relevantes na agropecuária nacional, a busca por meios alternativos de se obter fertilizantes, ração animal e bioenergia foi a motivação mais comum de tais artigos. A Espanha foi a terceira com maior número de pesquisas sobre biorremediação, sendo que a Europa tem buscado intensificar pesquisas em tecnologias verdes e bioprodutos de alto valor agregado, não é de se impressionar que um país europeu tenha tantos artigos publicados na área.

O segundo assunto mais abordado foram as biorrefinarias. A capacidade de microalgas produzirem vários produtos de alto valor agregado simultaneamente, inclusive paralelamente à biorremediação impacta em ganhos econômico-ambientais muito favoráveis, inclusos nos conceitos de bioeconomia circular. O bioproduto mais comum abordado neste tópico foi a capacidade de produzir-se bioenergia e biocombustíveis. Além dos biofertilizantes e bioestimulantes, nutracêuticos, bioplásticos e até nanopartículas foram estudados.

Tabela 7: Subtópicos de Biorrefinaria e bioprodutos

| | |
|------------------------------------|-----------|
| Biorrefinaria e bioprodutos | 42 |
| Bioenergia e biocombustíveis | 40 |
| Biofertilizantes | 27 |

| | |
|-----------------|----|
| Bioestimulantes | 6 |
| Nutracêuticos | 15 |
| Bioplásticos | 8 |
| Nanopartículas | 2 |

As condições de plantio foram o terceiro grupo de assunto mais abordado nos artigos, neles estudos detalhando as mudanças nas condições do solo, a comparação da eficiência de fertilizantes e seus impactos ambientais e alguns especificando as mudanças na taxa de crescimento e desenvolvimento de certas plantas quando adotados os biofertilizantes microalgais, o peso seco, a absorção de nutrientes, o número e tamanho das folhas, vários desses dados foram discutidos.

Tabela 8: Subtópicos de Condições de plantio

| Condições de plantio | 3 |
|-------------------------------------|----------|
| Estudo do solo | 7 |
| Estudo comparativo de fertilizantes | 16 |
| Crescimento de plantas | 21 |

Alguns artigos abordaram a maneira mais apropriada de se fertilizar as plantas, aparecendo 13 vezes. Em 5 deles água reciclada de algum efluente biorremediado foi usada para fertilização, em alguns deles sob a forma de hidroponia, técnica de plantio que consiste no cultivo de plantas na ausência de solo, somente como uma fonte líquida rica em nutrientes. Em seguida tivemos técnicas com fertilizantes diluídos no meio líquido e irrigadas, com a fertirrigação e spray foliar aparecendo 3 e 2 vezes respectivamente. Em 3 dos casos tivemos a aplicação de biochar, também chamado de carvão vegetal, que é aplicado no estado sólido diretamente no solo. Por fim tivemos 2 estudos com o pré-

tratamento de sementes, onde principalmente com o uso de bioestimulantes elas são germinadas.

Tabela 9: Subtópicos de Técnicas de aplicação

| Técnicas de aplicação | 13 |
|------------------------------|-----------|
| Spray foliar | 2 |
| Fertirrigação | 3 |
| Reciclo de água e hidroponia | 5 |
| Pré-tratamento de sementes | 2 |
| Biochar | 3 |

As diversas formas de estudos ambientais frequentemente foram estudadas. A capacidade de biorremediação e as biorrefinarias estão diretamente ligadas tanto à bioeconomia quanto à economia circular. Ainda tivemos vários estudos de ACV, que permitem analisar os impactos ambientais da adoção ou não de diferentes fertilizantes, ou as ações biorremediadoras das microalgas.

Tabela 10: Subtópicos de Estudo ambiental

| Estudo ambiental | 21 |
|-------------------------|-----------|
| ACV | 9 |
| Bioeconomia | 10 |
| Economia circular | 10 |

Ainda certos artigos focaram-se especificamente em uma ou mais microalgas, acontecendo 40 vezes. Na tabela 11 é possível ver quantas vezes cada uma dessas microalgas teve destaque

Tabela 11: Microalgas estudadas nos artigos

| Microalga estudada | Número de artigos |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Chlorella | 23 |
| Scenedesmus sp | 11 |
| Arthrospira platensis (Spirulina) | 8 |
| Dunaliella | 2 |
| Chlamydomonas | 2 |
| Vicia faba | 1 |
| Tetradismus obliquus | 1 |
| Chlorococcum | 1 |
| Micractinium | 1 |
| Porphyridium sp | 1 |
| Desmodesmus | 1 |
| Botryococcus | 1 |

| | |
|-------------|---|
| Acutodesmus | 1 |
| Acutodesmus | 1 |

A capacidade de ação biodefensiva de microalgas foi objeto de estudo 7 vezes. Isto implica na não necessidade de se usar pesticidas químicos, que podem gerar danos ao meio ambiente e a vida humana.

Por fim, 4 estudos focaram em um certo tipo de nutriente. Em 3 deles o macronutriente fósforo teve destaque e em um foi o caso do nitrogênio.

A base do Science Direct possui uma série de funcionalidades que permitem navegar entre os resultados de maneira mais eficiente. É possível através delas verificar os documentos filtrando pelo ano de publicação, tipo de artigo, periódico de publicação, área de estudo e por último os documentos que são abertos ao público sem a necessidade de comprá-los para obtê-los.

Quanto ao tipo de artigo falamos de artigos de revisão, artigos de pesquisa, capítulos de livros, ou pequeno comunicado conforme apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Tipos de artigo na base do Science Direct

| Tipo de artigo | Número de artigos |
|-----------------------|--------------------------|
| Artigos de pesquisa | 60 |
| Capítulos de livros | 20 |
| Artigos de revisão | 19 |
| Pequeno comunicado | 1 |
| Total | 100 |

Outra funcionalidade bem útil é a capacidade de filtrar os resultados por ano de publicação. A maior parte dos artigos se concentraram a partir do ano de 2020, isso pode estar diretamente ligado à questão da pandemia, com limitações no tráfego de pessoas e produtos dificultando o transporte e importação de alimentos, é de se esperar que muitas pesquisas tivessem ganhado relevância nessa área no período. A intensificação do uso da internet pode ter sido uma boa contribuição também, uma evidência para isso são os pesquisadores em alguns destes artigos estavam vinculados a instituições em diferentes países, e a transmissão de dados pela internet viabiliza estes tipos de cooperação.

Outra importante funcionalidade é a capacidade de filtrar os artigos por área de estudo. As áreas predominantes foram Ciência Ambiental, Energia, Agricultura e Ciências Biológicas, Engenharia Química, Bioquímica e Microbiologia. Uma vez que as microalgas podem ser usadas como biorremediadores para tratamento de efluentes e biofertilizantes apresentam menores impactos ambientais que fertilizantes minerais e químicos/sintéticos justificam a presença de artigos classificados na área de Ciência Ambiental. O aproveitamento energético e a geração simultânea de bionergia e biofertilizantes é um fator que leva a Energia aparecer com relevância. Em um trabalho sobre microalgas na agricultura é natural a classificação em Agricultura e Ciências Biológicas. O cultivo e produção de bioprodutos de microalgas está diretamente ligado às áreas de Engenharia Química, Bioquímica e Microbiologia, evidenciando a presença de tais resultados. É interessante que até Ciências Sociais são impactadas pelo uso de microalgas na agricultura, isto está ligado à capacidade de gerar fertilizantes localmente, inclusive em pequenas comunidades e o tratamento paralelo e/ou simultâneo de efluentes, promovendo a saúde e bem-estar local.

Outras informações como periódico de publicação, tipo de artigo e se os artigos são do tipo Open access & Open archive também podem ser visualizadas.

Quando analisada a origem dos artigos vemos que a maioria viera da Índia, com a segunda maior população do mundo (1,41 bilhão de habitantes e 17,5% da população mundial em 2022) e graves problemas de saneamento básico, sendo que os estudos de lá abordavam principalmente a capacidade de biorremediação das microalgas aliados à produção de biofertilizantes. A segunda maior origem foi do Brasil com uma das 10 maiores

populações do mundo e maior exportador agropecuário faz com que pesquisas referentes ao tema biofertilizantes sejam justificáveis. A Rússia teve um número considerável de artigos, eles abordavam principalmente a capacidade das microalgas de absorver fósforo e a consequente produção de biofertilizantes ricos nele, o grande interesse na área deve ser em decorrência deste país ser um dos maiores exportadores de fertilizantes contendo tal macronutriente

4.3 Resultado da busca por patentes

Somente 8 patentes foram encontradas, mas após a leitura de todas elas. Todos os 8 resultados foram obtidos utilizando como palavras-chaves *fertilizante* e microalg*, mas nenhum resultado foi obtido usando-se "bioestimulante* microalg*.

Metade das patentes registradas pertencem a universidades federais, duas a empresas nacionais privadas, duas a uma pessoa física e uma a uma empresa internacional indiana. Das nacionais a maioria delas, seis das sete, foram registradas em São Paulo e somente uma delas no Paraná. É um número bem baixo de patentes na área e muito concentradas em apenas uma região do país, tendo em vista que São Paulo é a região mais rica do país e consequentemente abriga a maior parte das unidades de pesquisa nele. A Índia, país que publicou o maior número de artigos na área de biofertilizantes de microalgas possui forte interesse na área visto que tem a segunda maior população do mundo e tem como além da produção de biofertilizantes a partir de microalgas, uma maneira barata, de fácil implementação e menores impactos econômicos que as convencionais, portanto é natural que produzam patentes a ponto de publicá-las até fora do próprio país para proteger os seus interesses tecnológico-comerciais.

Já na base internacional Espacenet 21 patentes foram encontradas. A pesquisa é mais rápida pela possibilidade de aplicar os operadores booleanos de maneira mais eficiente.

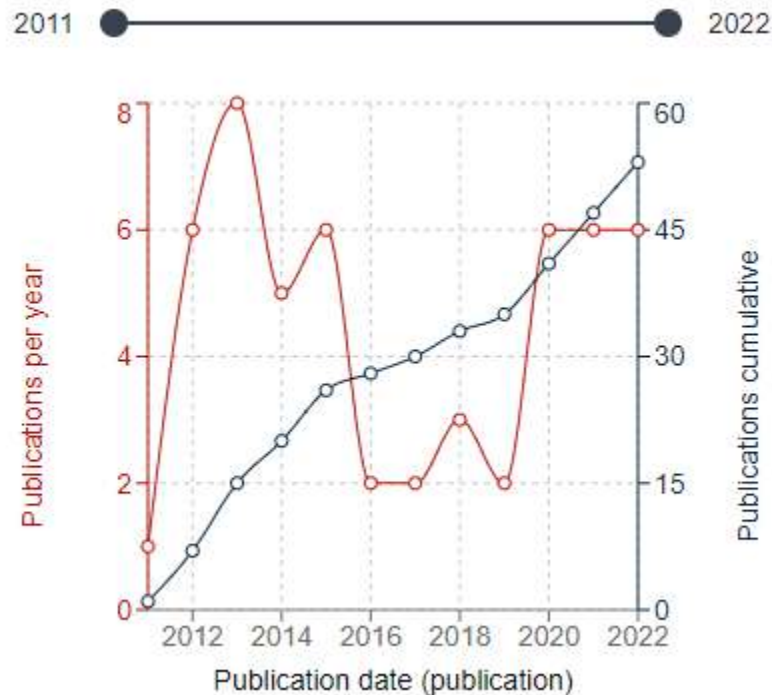
A plataforma tem um sistema de filtros onde dados como qual o número de países em que elas foram aplicadas, ou o número de aplicações feitas por ano. Apesar de serem somente 21 patentes, elas foram aplicadas 53 vezes, portanto algumas foram aplicadas em mais de 2 países, a evolução dos registros pode ser vista no gráfico. O país onde elas tiveram os seus direitos de invenção protegidos com mais frequência foi na China com 14 registros, seguido da Organização Mundial de Propriedade Intelectual – OMPI (WIPO) com 8, a

tabela 12 mostra o número de registros de publicação por país e a figura 20 mostras as publicações por ano e data.

Tabela 13: Aplicações de patentes por país na base de patentes Espacenet

| País | Aplicações |
|----------------------------------|-------------------|
| China | 14 |
| OMPI | 8 |
| Austrália | 7 |
| EUA | 7 |
| Espanha | 5 |
| Canadá | 3 |
| Organização Europeia de Patentes | 3 |
| Brasil | 1 |
| Índia | 1 |
| Japão | 1 |
| México | 1 |
| Rússia | 1 |

Figura 20: Relação publicações por ano/data/cumulativas



Fonte: Espacenet

A China com a segunda maior economia do mundo (US\$ 11,2 trilhões em 2022) e a maior população (1,41 bilhões de habitantes e 17,5% da população global em 2022) teve o maior registro de patentes, algo plenamente natural tendo em vista que é o maior produtor mundial de alimentos, principalmente para atender à sua própria demanda interna sendo que apresenta quase um quinto da população mundial. O segundo foi a OMPI, sendo que todos os países signatários a ela aceitam os seus registros de patente, portanto justificando o seu alto número de registros. EUA possuindo a maior economia do mundo (US\$ 18,6 trilhões em 2022) e a terceira maior população do mundo (332 milhões de habitantes em 2022) ficou em terceiro lugar nos registros, justificável tanto pela importância econômica e potencial consumidor frente a sua grande população.

Capítulo 5 Conclusão

- O cultivo de microalgas somente para elaboração de biofertilizantes é economicamente inviável, o ideal é produzir uma série de coprodutos segundo os conceitos de biorrefinaria para se aumentar os ganhos

- Devido à sua grande demanda nutricional e capacidade de aclimatização, o ideal é produzir microalgas em efluentes, obtendo-se biomassa microalgal e tratando os contaminantes, como os custos do tratamento biológico com microalgas são menores que os tradicionais isso impacta em um ganho econômico
- O uso concomitante de algas e bactérias na codigestão anaeróbia melhora o tratamento de efluentes e é capaz de aumentar a biomassa produzida, sendo, portanto, mais vantajoso
- A produção de biocombustíveis de microalgas gera muita biomassa residual, a produção simultânea de biofertilizantes em biorrefinarias é uma boa solução
- A biomassa residual da agricultura, assim como os seus efluentes podem ser aproveitados pelas microalgas, que geram bioprodutos de volta na forma de bioestimulantes, biofertilizantes, biodefensivos e bioenergia se inserindo na economia circular
- O baixo número de patentes nacional e internacionalmente na área permite grande retorno financeiro com a sua diversa formação de produtos, justificando o seu investimento
- Segundo dados do CNPq, existem poucos grupos de pesquisa desenvolvendo linhas de pesquisa nessa área, e ainda são concentrados em poucos estados, sendo que mais deles devem ser criadas para se aproveitar nas diversas regiões do país com diferentes climas, biomas e demais condições
- Os impactos ambientais positivos e a sua inserção na bioeconomia circular podem configurar ganhos comerciais

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ana Álvarez-González, Can microalgae grown in wastewater reduce the use of inorganic fertilizers? 2022
- Ashfaq Ahmad, Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and bioproducts, 2021

Bhupendra Koul, Phycoremediation: A sustainable alternative in wastewater treatment (WWT) regime, 20

Bunushree Behera, Integrated microalgal biorefinery for the production and application of biostimulant bioeconomy, 2021

Campbell et al., Sustainable intensification: what is its role in climate smart agriculture? 2014

Cardoso, Comparison of *Spirulina platensis* microalgae and commercial activated carbon as adsorbent for the removal of reactive red 120 dye from aqueous effluents, 2012

Chandan Mukherjee, Rajojit Chowdhury, Krishna Ray, Parboiled rice effluent: A wastewater niche for microalgae and cyanobacteria with growth coupled to comprehensive remediation, 2020

Charles Oluwaseun, Chapter 14: Sustainability of biofertilizers and other allied products from genetic engineering of microorganisms, 2022

Daniela Zapata, Phytohormone production and morphology of *Spirulina platensis* grown in dairy wastewater, 2022

Dissertação de Mestrado: Penha, Valéria de Luca. Produtividade Total de Fatores no Brasil: Impacto de investimentos em infraestrutura e efeitos do IDE e comparação internacional, 2014. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, SP.

Elena Barbera, Techno-economic analysis of a micro-scale biogas plant integrated with microalgae cultivation and treatment of organic municipal waste, 2022

F.S. Wang., Putative model based on iTRAQ proteomics for *Spirulina* morphogenesis mechanisms, 2018

Farid Rachidi, Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic activity, 2020

Flavio Martini, Giorgia Beghini, Matteo Ballottari, The potential use of *Chlamydomonas reinhardtii* and *Sorokiniana* as biostimulants on maize plants, 2021

Flavio Martini, The potential use of *Chlamydomonas reinhardtii* and *Chlorella sorokiniana* as biostimulants for plants, 2021

Francisca et al., Nutrient recovery from wastewaters by microalgae and its potential application as bio-chemicals, 2021

Gabriela F. Ferreira, Effects of cultivation conditions on *Chlorella vulgaris* and *Desmodesmus sp.* grown in agro-industry residues, 2021

Gannoru Kankanamalage, *Haematococcus pluvialis*: A potential feedstock for multiple-product biorefining, 2021

Gasques, José Garcia *et al*, Produtividade Total dos Fatores na Agricultura – Brasil e Países Seleccionados, 2021

Hariz, H.B., Takriff, M.S., 2017. Palm oil mill effluent treatment and CO₂ sequestration by using microalgae: Sustainable strategies for environmental protection, 2020

Jorge Alberto Vieira, Insights into the technology utilized to cultivate microalgae in dairy effluents, 2020

K. Pooja, V. Priyanka, V. Raghavender, Cost-effective treatment of sewage wastewater using microalgae and its application as bio-fertilizer, 2022

Luiz Gabriel Gemin, Átila Francisco Mógor, Gilda Mógor, Microalgae associated to humic acid as a novel bioremediation strategy for improving onion growth and yield, 2019

M.K. Tahami et al., Plant growth promoting rhizobacteria in an ecological cropping system: A study on basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil production, 2017

Miranda, Evaristo – Potência Agrícola e Ambiental – Áreas cultivadas no Brasil e no mundo, 2018.

Mobin, S., Alam, F., Some promising microalgal species for commercial applications: a review, 2017

Nabila Shehata, Role of microalgae in achieving sustainable development goals and circular economy, 2021

Nzayisenga, Effects of light intensity on growth and lipid production in microalgae grown in wastewater, 2021

Página virtual da Secretaria da Comunicação do Governo do Estado de Tocantins
<https://www.to.gov.br/secom/noticias/to-apresenta-grande-potencial-de-expansao-do-matopiba-regiao-como-a-nova-fronteira-agricola-brasileira/13iopzlnjm9o>. Acesso em 07/01/2023.

Página virtual do AGROSTAT – Estatísticas de Comércio Exterior de Agronegócio Brasileiro
<https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm> . Acessado em 07/01/2023.

Página virtual do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA)
<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/afinal-quanto-o-agronegocio-representa-no-pib-brasileiro.aspx#:~:text=Se%20o%20objetivo%20%C3%A9%20saber,m%C3%A9dia%20de%201995%20>
Acesso em 07/01/2023.

Página virtual do Sistema de Inteligência Territorial da Macrologística Agropecuária Brasileira da Embrapa
<https://www.embrapa.br/macrologistica/producao-agropecuaria>. Acesso em 07/01/2023

Priyanka Gehlot, Chapter 17: Cyanobacterial and microalgal bioremediation: an efficient and eco-friendly approach toward industrial wastewater treatment and value-addition, 2021

Rajaa Kholssi, Biotechnological uses of microalgae: A review on the state of the art and challenges for the circular economy, 2021

Rajaa Kholssi, Priscila Vogelei Ramos, Carlos Rad, Biotechnological uses of microalgae: A review on the state of the art and challenges for the circular economy, 2021

Reetz, Harold F., Fertilizantes e o seu uso eficiente / tradução : Alfredo Scheid Lopes. – São Paulo : ANDAC, 2015

Ronga et al., Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions, 2019

Rozi Sharma, Recent advances in microalgae-based remediation of industrial and non-industrial wastewater: simultaneous recovery of value-added products, 2021

Schuermans, Comparison of the photosynthetic yield of cyanobacteria and green algae: different methods and different answers, 2015

Shahabaldin Rezaia, Recent advances on the removal of phosphorus in aquatic plant-based systems, 2021

Shakeel A. Khan, Microalgae based biofertilizers: A biorefinery approach to phycoremediate wastewater, biodiesel and manure, 2018

Stirk and Van Staden, Seaweed Products as Biostimulants in Agriculture". World Seaweed Resources, 2018

V. Barone et al, Root morphological and molecular responses induced by microalgae extracts in sugar beet (*Beta vulgaris* L.), 2018

Van Gerpen, J., Biodiesel processing and production. 2005

APÊNDICE

| Apêndice A – Resultados de busca no Science Direct | | | |
|---|-------------------|-------------------|---|
| Artigo | Ano de publicação | Tipo de artigo | Tópicos |
| Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices | 2021 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none">● Bioestimulante● Biofertilizante● Biodefensivo● Microalgas estudadas<ol style="list-style-type: none">1. <i>Arthrospira platensis</i>2. <i>Chlorella sorokiniana</i>3. <i>Vicia faba</i>● Condições de plantio<ol style="list-style-type: none">1. Estudo comparativo de fertilizantes |

| | | | |
|--|-------------|---------------------------|--|
| <p>Aquaculture wastewater treatment through microalgal. Biomass potential applications on animal feed, agriculture, and energy</p> | <p>2021</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioproductos 1. Bioestimulante 2. Biofertilizante 3. Bioenergia e biocombustíveis 4. Nutracêuticos |
| <p>Bioremediation of cattle manure using microalgae after pre-treatment with biomass ash</p> | <p>2021</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Técnica de aplicação 1. Tratamento de semente ● Biorremediação 2. Pecuária ● Microalgas estudadas 3. Chlorella protothecoides 4. Tetrademus obliquus |
| <p>Biostimulants obtained after pilot-scale high-pressure homogenization of Scenedesmus sp. grown in pig manure</p> | <p>2021</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulantes ● Microalga estudada 1. Scenedesmus sp. ● Biorremediação 1. Pecuária |
| <p>Biostimulation with phycocyanin-rich Spirulina extract in hydroponic vertical farming</p> | <p>2022</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Microalga estudada 1. Arthrospira ● Condições de plantio 1. Crescimento de planta 1. Alface ● Técnica de aplicação 1. Reciclo de água e hidroponia |

| | | | |
|---|------|--------------------|---|
| Chapter 4: Metabolites produced by macro- and microalgae as plant biostimulants | 2021 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Condições de plantio 1. Estudo comparativo de fertilizantes |
| Chapter 4: Microalgae-based technologies for circular wastewater treatment | 2022 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Bioestimulante ● Biofertilizante ● Estudo ambiental 1. Economia circular |
| Chapter 9: Microalgal based biostimulants as alleviator of biotic and abiotic stresses in crop plants | 2022 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioestimulante 2. Bioenergia e biocombustíveis |
| Comparative life cycle assessment of conventional and novel microalgae production systems and environmental impact mitigation in urban-industrial symbiosis | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental 1. ACV ● Biorremediação 1. Industrial 2. Urbano ● Bioestimulante ● Microalga estudada 1. Scenedesmus almeriensi |
| Effect of cell disruption methods on the extraction of bioactive metabolites from microalgal biomass | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante |
| Effectiveness of green microalgae as biostimulants and biofertilizer through foliar spray and soil drench method for tomato cultivation | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Bioestimulante ● Condições de plantio 1. Estudo comparativo de fertilizantes |

| | | | |
|---|------|--------------------|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none"> 2. Crescimento de plantas <ul style="list-style-type: none"> 1. Tomate <ul style="list-style-type: none"> ● Técnicas de aplicação <ul style="list-style-type: none"> 1. Spray foliar 2. Fertirrigação <ul style="list-style-type: none"> ● Microalgas estudadas <ul style="list-style-type: none"> 1. Chlorella vulgaris <ul style="list-style-type: none"> ● |
| Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Biofertilizante ● Técnica de aplicação <ul style="list-style-type: none"> 1. Pré-tratamento de sementes 2. Spray foliar <ul style="list-style-type: none"> ● Condições de plantio <ul style="list-style-type: none"> 1. Crescimento de plantas <ul style="list-style-type: none"> 1. Tomate |
| Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>) | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Condições de plantio <ul style="list-style-type: none"> 1. Crescimento de plantas <ul style="list-style-type: none"> 1. Tomate <ul style="list-style-type: none"> ● Microalga estudada <ul style="list-style-type: none"> 1. Chlorophyta |
| Evaluation of microalgae as bioremediation agent for poultry effluent and biostimulant for germination | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Técnica de aplicação <ul style="list-style-type: none"> 1. Pré-tratamento de sementes <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação <ul style="list-style-type: none"> 1. Pecuária <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante |
| Exogenous carbon source and phytohormone supplementation enhanced growth rate and metabolite production in | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Microalga estudada <ul style="list-style-type: none"> 1. Scenedesmus obtusus Meyen |

| | | | |
|---|------|--------------------|---|
| freshwater microalgae <i>Scenedesmus obtusus</i> Meyen | | | |
| Germination screen for microalgae-generated plant growth biostimulants | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Crescimento de plantas <ol style="list-style-type: none"> 1. Espinafre ● Microalgas estudadas <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Chlorococcum</i> 2. <i>Micractinium</i> 3. <i>Scenedesmus</i> 4. <i>Chlorella</i> |
| Growth, biostimulant and biopesticide activity of the MACC-1 <i>Chlorella</i> strain cultivated outdoors in inorganic medium and wastewater | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Biodefensivo ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Chlorella</i> ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes ● Biorremediação |
| Integrated microalgal biorefinery for the production and application of biostimulants in circular bioeconomy | 2021 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Estudo ambiental <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioeconomia 2. Economia circular ● Biorrefinaria e bioprodutos |
| Microalgae (<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck) alleviates drought stress of broccoli plants by improving nutrient uptake, secondary metabolites, and antioxidative defense system | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Chlorella vulgaris</i> ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Crescimento de plantas <ol style="list-style-type: none"> 1. Brócolis |

| | | | |
|--|-------------|---------------------------|--|
| <p>Microalgae associated to humic acid as a novel biostimulant improving onion growth and yield</p> | <p>2019</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes 2. Crescimento de plantas <ol style="list-style-type: none"> 1. Cebola 2. Feijão moyashi ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. Scenedesmus |
| <p>Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: Current needs and challenges</p> | <p>2022</p> | <p>Artigo de revisão</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Biofertilizantes 2. Bioestimulante 3. Bioplásticos 4. Bioenergia e biocombustíveis |
| <p>Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing</p> | <p>2020</p> | <p>Artigo de revisão</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Bioplásticos 3. Nutracêutico 4. Pigmentos ● Microalgas estudadas <ol style="list-style-type: none"> 1. Dunaliella 2. Botryococcus 3. Chlamydomonas 4. Chlorella 5. Arthrospira |
| <p>Microalgae from food agro-industrial effluent as a renewable resource for agriculture: A life cycle approach</p> | <p>2022</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Agrícola ● Estudo ambiental <ol style="list-style-type: none"> 1. ACV ● Estudo ambiental <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioeconomia ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo do solo |

| | | | |
|---|------|--------------------|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none"> 2. Crescimento de plantas 1. Milho |
| <p>Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution</p> | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Condições de plantio 1. Crescimento de planta 1. Tomate ● Técnica de aplicação 1. Reciclo de água e hidroponia ● Microalgas estudadas 1. Arthrospira 2. Dunaliella salina 3. Porphyrodium sp |
| <p>Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture</p> | 2021 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Biofertilizante ● Condições de plantio 1. Estudo do solo |
| <p>Spirulina platensis extract improves the production and defenses of the common bean grown in a heavy metals-contaminated saline soil</p> | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalga estudada 1. Arthrospira ● Condições de plantio 1. Estudo do solo 2. Crescimento de plantas 1. Feijão |
| <p>The potential use of Chlamydomonas reinhardtii and Chlorella sorokiniana as biostimulants on maize plants</p> | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalgas estudadas 1. Chlamydomonas reinhardtii 2. Chlorella sorokiniana ● Bioestimulante ● Condições de plantio 1. Crescimento de plantas 1. Milho |

| | | | |
|---|------|--------------------|---|
| The role of microalgae in the bioeconomy | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental 1. Bioeconomia 2. Economia circular ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Nutracêutico 2. Bioestimulante 3. Bioenergia e biocombustíveis ● Biorremediação |
| Unconventional high-value products from microalgae: A review | 2021 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioestimulante 2. Bioenergia e biocombustíveis 3. Nutracêuticos 4. Pigmentos |
| Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and high-value bioproducts | 2022 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação 1. Urbano 2. Industrial 3. Agrícola 4. Pecuária 5. Metais pesados ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizante |
| Algal biomass from wastewater: soil phosphorus bioavailability and plants productivity | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● de fertilizantes ● Condições de plantio 1. Estudo comparativo de fertilizantes 2. Crescimento das plantas 1. Milho |
| AlgalTextile - a new biohybrid material for wastewater treatment | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biofertilizantes ● Microalga estudada 1. Chlorella sorokiniana |

| | | | |
|--|------|--------------------|---|
| An integrated system for agricultural wastewater treatment | 1995 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação 1. Urbano ● Técnica de aplicação 1. Reciclo de água e hidroponia ● Biofertilizante |
| Application of a microalgal slurry to soil stimulates heterotrophic activity and promotes bacterial growth | 2017 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Bioestimulante ● Microalga estudada 1. Chlorella ● Biorremediação ● Condições de plantio 1. Estudo do solo |
| Bacillus and microalgae biofertilizers improved quality and biomass of Salvia miltiorrhiza by altering microbial communities | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Condições de plantio 1. Crescimento de planta 1. Sálvia |
| Bio-Based Products from Microalgae Cultivated in Digestates | 2018 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Nutracêutico 3. Biofertilizante |
| Bio-inspired materials for nutrient biocapture from wastewater: Microalgal cells immobilized on chitosan-based carriers | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Microalga estudadas 1. Lobosphaera ● Biorremediação |
| Biotechnological uses of microalgae: A review on the state of the art and challenges for the circular economy | 2021 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental 1. Economia circular 2. Bioeconomia ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizantes 2. Pigmentos 3. Bioenergia e biocombustíveis 4. Nutracêuticos |

| | | | |
|--|-------------|---------------------------|---|
| <p>Can microalgae grown in wastewater reduce the use of inorganic fertilizers?</p> | <p>2022</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Urbano ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes 2. Crescimento de plantas <ol style="list-style-type: none"> 1. Manjeriçãode-folha-larga ● Microalgas estudadas <ol style="list-style-type: none"> 1. Scenedesmus 2. Chlorella ● |
| <p>Cattle wastewater as a low-cost supplement augmenting microalgal biomass under batch and fed-batch conditions</p> | <p>2022</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Pecuária 2. Urbano ● Técnica de aplicação <ol style="list-style-type: none"> 1. Reciclo de água e hidroponia ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. Chlorella thermophile |
| <p>Chapter 10: Biorefinery and bioremediation potential of microalgae</p> | <p>2022</p> | <p>Capítulo de livro</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Nutracêuticos 3. Biofertilizantes 4. Bioplásticos ● Biorremediação |
| <p>Chapter 11: Microalgal applications toward agricultural sustainability: Recent trends and future prospects</p> | <p>2021</p> | <p>Capítulo de livro</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Bioestimulante ● Biodefensivo ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes |

| | | | |
|--|------|-------------------|--|
| Chapter 11: Recent developments and challenges: a prospectus of microalgal biomass valorization | 2022 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizantes 2. Bioplásticos 3. Nutracêuticos 4. Bioenergia e biocombustíveis |
| Chapter 14: Sustainability of biofertilizers and other allied products from genetically modified microorganisms | 2022 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Estudo ambiental 1. Bioeconomia |
| Chapter 16: Agriculturally important microbial biofilms: Biodiversity, ecological significances, and biotechnological applications | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biodefensivo ● Bioestimulante ● Biofertilizante ● Biorremediação |
| Chapter 17: Cyanobacterial and microalgal bioremediation: an efficient and eco-friendly approach toward industrial wastewater treatment and value-addition | 2022 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizante 3. Bioplásticos 4. Biodefensivo 5. Nutracêuticos ● Biorremediação 1. Codigestão anaeróbia |
| Chapter 19: Environmental Resilience by Microalgae | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação 1. Agrícola 2. Indústria ● Microalgas estudadas 1. Chlorella 2. Scenedesmus ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis |

| | | | |
|---|------|-------------------|---|
| Chapter 2: Integrated innovative biorefinery for the transformation of municipal solid waste into biobased products | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação 1. Urbano ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizante 2. Bioenergia e biocombustíveis 3. Bioestimulante |
| Chapter 20: Microalgae-based Remediation of Wastewaters | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizante ● Biorremediação 1. Agricultura 2. Urbano |
| Chapter 23: Cyanobacteria: potential source of biofertilizer and synthesizer of metallic nanoparticles | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Nutracêuticos 3. Nanopartículas |
| Chapter 28: Microalgal biorefineries | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental 1. Economia circular 2. Bioeconomia ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizantes 2. Nutracêuticos 3. Bioenergia e biocombustíveis |
| Chapter 29: The bioeconomy of microalgae-based processes and products | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental 1. Bioeconomia 2. Economia circular ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizantes 3. Nutracêuticos |

| | | | |
|---|------|--------------------|---|
| Chapter 31: Exploring the dynamics of microalgal diversity in high-rate algal ponds | 2021 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Biofertilizante 2. Bioenergia e biocombustíveis 3. Nutraceutico |
| Chapter 40: Exploring the potential of microalgae for the bioremediation of agro-industrial wastewaters | 2020 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Biofertilizante 2. Nutraceutico 3. Bioenergia e biocombustíveis ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Agrícola 2. Indústria 3. Codigestão anaeróbia |
| Chapter 5: Phosphorus biofertilizer from microalgae | 2021 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Nutrientes <ol style="list-style-type: none"> 1. Fósforo ● Biorremediação ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes |
| Chapter 7: Valorization of microalgal biomass for fertilizers and nanoparticles | 2022 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizantes ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Nanopartículas |
| Chapter 9: Life cycle assessment of microalgal biomass for valorization | 2022 | Capítulo de livro | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental <ol style="list-style-type: none"> 1. ACV ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Nutraceutico 3. Biofertilizante 4. Pigmentos |
| Chlorella vulgaris and Pseudomonas putida interaction modulates phosphate | 2018 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. Chlorella vulgaris ● Biorremediação |

| | | | |
|--|------|--------------------|---|
| trafficking for reduced arsenic uptake in rice (<i>Oryza sativa</i> L.) | | | <ol style="list-style-type: none"> 1. Agrícola 2. Codigestão anaeróbia <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Nutrientes 1. Fósforo |
| Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Estudo ambiental <ol style="list-style-type: none"> 1. Economia circular ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Chlorella minutissima</i> <ul style="list-style-type: none"> ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo do solo 2. Crescimento de plantas <ol style="list-style-type: none"> 1. Milho 2. Espinafre ● Estudo ambiental 1. ACV |
| Cost-effective treatment of sewage wastewater using microalgae <i>Chlorella vulgaris</i> and its application as bio-fertilizer | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Urbano ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Chlorella vulgaris</i> <ul style="list-style-type: none"> ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes 2. Crescimento de plantas <ol style="list-style-type: none"> 1. Tomate |
| Decontamination of industrial wastewater using microalgae integrated with biotransformation of the biomass to green products | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Indústria ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizantes 3. Bioplásticos |

| | | | |
|---|------|--------------------|--|
| Effect of pretreatments on biogas production from microalgae biomass grown in pig manure treatment plants | 2018 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação 1. Codigestão anaeróbia 2. Pecuária ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizante |
| Effects of cultivation conditions on <i>Chlorella vulgaris</i> and <i>Desmodesmus</i> sp. grown in sugarcane agro-industry residues | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Técnica de aplicação 1. Biochar ● Biorremediação 1. Indústria 2. Agrícola ● Microalgas estudadas 1. <i>Chlorella vulgaris</i> 2. <i>Desmodesmus</i> sp |
| Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Biofertilizante ● Condições de plantio 1. Crescimento de plantas 1. Tomate 2. Pimenta 3. Beringela 4. Trigo de inverno ● Técnica de aplicação 1. Pré-tratamento de sementes 2. Spray foliar ● Microalgas estudadas 1. <i>Acutodesmus</i> sp 2. <i>Chlorella vulgaris</i> 3. <i>S. quadricauda</i> 4. <i>Arthrospira plantensis</i> 5. <i>Scenedesmus</i> sp |
| Evaluation of the fertilizer potential of <i>Chlorella vulgaris</i> and <i>Scenedesmus</i> | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação 1. Agrícola |

| | | | |
|--|------|--------------------|---|
| obliquus grown in agricultural drainage water from maize fields | | | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalgas estudadas 1. Chlorella vulgaris 2. Scenedemus obliquus |
| Formation, sedimentation and germination properties of Anabaena akinetes | 2003 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalga estudada 1. Anabaena cylindrica ● Biorremediação ● Biofertilizante |
| From toilet to agriculture: Fertilization with microalgal biomass from wastewater impacts the soil and rhizosphere active microbiomes, greenhouse gas emissions and plant growth | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação 1. Urbano ● Estudo ambiental 1. ACV |
| Haematococcus pluvialis: A potential feedstock for multiple-product biorefining | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalga estudada 1. Haematococcus pluvialis ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizantes 2. Nutracêuticos 3. Bioenergia e biocombustíveis |
| Insights into the technology utilized to cultivate microalgae in dairy effluents | 2021 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação 1. Indústria ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizante 2. Nutracêutico 3. Bioenergia e biocombustíveis |
| Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery | 2018 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental 1. ACV ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizante |

| | | | |
|--|-------------|---------------------------|--|
| <p>Life cycle assessment of microalgae systems for wastewater treatment and bioproducts recovery: Natural pigments, biofertilizer and biogas</p> | <p>2022</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental 1. ACV ● Biorremediação 1. Urbano 2. Industrial ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Pigmentos 2. Biofertilizante 3. Bioenergia e biocombustíveis ● Estudo ambiental 1. Bioeconomia 2. Economia circular |
| <p>Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach</p> | <p>2016</p> | <p>Artigo de revisão</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizantes 3. Nutracêuticos |
| <p>Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges</p> | <p>2018</p> | <p>Artigo de revisão</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biodefensivo ● Biorremediação 1. Agrícola |
| <p>Microalgae as versatile cellular factories for valued products</p> | <p>2014</p> | <p>Artigo de revisão</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizantes 2. Bioplásticos 3. Pigmentos 4. Bioenergia e biocombustíveis 5. Nutracêuticos |
| <p>Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach</p> | <p>2020</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Estudo ambiental 1. ACV ● Condições de plantio 1. Estudo do solo 2. Estudo comparativo de fertilizantes |

| | | | |
|--|-------------|---------------------------|---|
| <p>Microalgae based biofertilizers: A biorefinery approach to phycoremediate wastewater and harvest biodiesel and manure</p> | <p>2019</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Pecuária ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e Biocombustíveis ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes ● Microalgas estudadas <ol style="list-style-type: none"> 1. Chlorella minutissima 2. Scendesmus spp 3. Nostoc muscorum |
| <p>Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs: Scale-up considerations</p> | <p>2016</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalgas estudadas <ol style="list-style-type: none"> 1. Chlorella vulgaris 2. Scenedesmus obliquus 3. Consortium C ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Urbano ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Biofertilizantes 2. Bioplásticos 3. Bioenergia e biocombustíveis |
| <p>Microalgal biomass as a biofertilizer for pasture cultivation: Plant productivity and chemical composition</p> | <p>2020</p> | <p>Artigo de pesquisa</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizantes ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes ● Estudo ambiental <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioeconomia 2. Economia circular |
| <p>Nutrient recovery from wastewaters by microalgae and its potential application as bio-char</p> | <p>2018</p> | <p>Artigo de revisão</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biofertilizante ● Técnica de aplicação <ol style="list-style-type: none"> 1. Biochar |

| | | | |
|---|------|--------------------|--|
| Operational and economic aspects of Spirulina-based biorefinery | 2019 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizante 2. Bioenergia e biocombustíveis 3. Nutracêutico 4. Bioplástico ● Microalga estudada 1. Arthrospira |
| Outdoor production of microalgae biomass at pilot-scale in seawater using centrate as the nutrient source | 2017 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Microalga estudada 1. Nannochloropsis gaditana ● Biorremediação 1. Urbano ● Biorrefinaria e bioprodutos 1. Biofertilizante 2. Bioenergia e biocombustíveis |
| Parboiled rice effluent: A wastewater niche for microalgae and cyanobacteria with growth coupled to comprehensive remediation and phosphorus biofertilization | 2016 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação 1. Agrícola ● Nutrientes 1. Fósforo ● Biofertilizante ● Microalgas estudadas 1. Chlorella sp 2. Scenedesmus sp ● Condições de plantio 1. Estudo comparativo de fertilizantes 2. Crescimento de plantas 1. Tomate |
| Phycoremediation: A sustainable alternative in wastewater treatment (WWT) regime | 2022 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação |

| | | | |
|--|------|--------------------|---|
| Phytohormone production and morphology of <i>Spirulina platensis</i> grown in dairy wastewaters | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Bioestimulante ● Biofertilizante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Indústria ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Nutracêuticos ● Microalga estudadas <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Arthrospira platensis</i> |
| Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Crescimento de plantas <ol style="list-style-type: none"> 1. Pepino 2. Tomate 3. Pimenta 4. Feijão moyashi |
| Production of valuable platform chemicals through microalgal routes utilizing waste streams | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Nutracêutico 3. Biofertilizante |
| Recent developments in microalgal conversion of organic-enriched waste streams | 2020 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biodefensivo ● Biofertilizante ● Biorremediação |
| Recovery of vinasse with combined microalgae cultivation in a conceptual energy-efficient industrial plant: Analysis of related process considerations | 2022 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Indústria 2. Agrícola 3. Codigestão anaeróbia ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis ● Técnicas de aplicação <ol style="list-style-type: none"> 1. Reciclo de água e hidroponia |

| | | | |
|--|------|--------------------|---|
| Removal of nutrients from domestic wastewater by microalgae coupled to lipid augmentation for biodiesel production and influence of deoiled algal biomass as biofertilizer for <i>Solanum lycopersicum</i> cultivation | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ul style="list-style-type: none"> 1. Urbano ● Bioenergia e biocombustíveis ● Condições de plantio <ul style="list-style-type: none"> 1. Crescimento de plantas <ul style="list-style-type: none"> 1. Tomate |
| Role of microalgae in achieving sustainable development goals and circular economy | 2022 | Artigo de revisão | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos <ul style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Nutracêuticos 3. Biofertilizantes ● Biorremediação ● Estudo ambiental <ul style="list-style-type: none"> 1. Economia circular 2. Bioeconomia |
| Soil application of microalgae for nitrogen recovery: A life-cycle approach | 2019 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Estudo ambiental <ul style="list-style-type: none"> 1. ACV ● Biorremediação <ul style="list-style-type: none"> 1. Pecuária ● Biofertilizante ● Nutrientes <ul style="list-style-type: none"> 1. Nitrogênio |
| Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (<i>Oryza sativa</i> L.) crop | 2019 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Condições de plantio <ul style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes 2. Crescimento de plantas <ul style="list-style-type: none"> 1. Arroz ● Microalga estudadas <ul style="list-style-type: none"> 1. <i>Scenedesmus</i> sp |
| Techno-economic analysis of a micro-scale biogas plant integrated with microalgae cultivation for the treatment of organic municipal waste | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ul style="list-style-type: none"> 1. Urbano 2. Digestão anaeróbia ● Biorrefinaria e bioprodutos |

| | | | |
|--|------|--------------------|---|
| | | | 1. Bioenergia e Biocombustíveis |
| The biostimulating effects of viable microalgal cells applied to a calcareous soil: Increases in bacterial biomass, phosphorus scavenging, and precipitation of carbonates | 2019 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação ● Biofertilizante ● Bioestimulante ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo do solo |
| The growth of filamentous microalgae is increased on biochar solid supports | 2018 | Pequeno comunicado | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Técnica de aplicação <ol style="list-style-type: none"> 1. Biochar |
| Treating agricultural non-point source pollutants using periphyton biofilms and biomass valorization | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Agrícola <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Bioenergia e biocombustíveis 2. Biofertilizante 3. Nutracêuticos |
| Treatment of Rose Oil Processing Effluent with <i>Chlorella</i> sp. Using Photobioreactor and Raceway | 2021 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação ● Agrícolas ● Microalga estudada <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Chlorella</i> sp |
| Water resource recovery coupling microalgae wastewater treatment and sludge co-digestion for bio-wastes valorisation at industrial pilot-scale | 2022 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biofertilizante ● Biorremediação <ol style="list-style-type: none"> 1. Indústria 2. Codigestão anaeróbia <ul style="list-style-type: none"> ● Condições de plantio <ol style="list-style-type: none"> 1. Estudo comparativo de fertilizantes |
| Wealth from waste: Diatoms as tools for phycoremediation of wastewater and for obtaining value from the biomass | 2020 | Artigo de pesquisa | <ul style="list-style-type: none"> ● Biorrefinaria e bioprodutos <ol style="list-style-type: none"> 1. Biofertilizante 2. Bioenergia e biocombustíveis 3. Nutracêutico |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | <ul style="list-style-type: none">• Biorremediação• Microalga estudada <ol style="list-style-type: none">1. Diatomáceas |
|--|--|--|--|