

MICROALGAS COMO BIOFERTILIZANTE: UMA NOVA ESTRATÉGIA PARA O AVANÇO DA AGRICULTURA MODERNA, BIORREMEDIAÇÃO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS E MITIGAÇÃO DE CARBONO ATMOSFÉRICO

Data de submissão: 15/02/2023

Data de aceite: 01/03/2023

Laiza Santos Dagnaisser

UFRRJ, Dep. de Engenharia
Seropédica – RJ

<http://lattes.cnpq.br/5441541036677159>

Marcela Granato Barbosa dos Santos

UFRRJ, Dep. de Engenharia
Seropédica – RJ

<http://lattes.cnpq.br/5685584434353197>

Anderson Gomide Costa

UFRRJ, Dep. de Engenharia
Seropédica – RJ

<http://lattes.cnpq.br/6959807888629144>

Daniel Fonseca de Carvalho

UFRRJ, Dep. de Engenharia
Seropédica – RJ

<http://lattes.cnpq.br/4871187664578422>

Henrique Vieira de Mendonça

UFRRJ, Dep. de Engenharia
Seropédica – RJ

<http://lattes.cnpq.br/8897355054570578>

bioeconomia. Por esta razão, este capítulo aborda contribuições recentes de microalgas no setor agrícola e pecuário, na produção de biofertilizantes e bioestimulantes a partir de microalgas e uma compilação de pesquisas recentes informando a produtividade em biomassa, biomassa seca e porcentagens de proteínas de biomassa de microalgas. São discutidos o status, tendências, progresso da pesquisa, aplicabilidade e lacunas existentes no uso de microalgas como biorremediadoras de águas residuárias, biofixadoras de carbono e como biofertilizantes na agricultura moderna. Desafios enfrentados pela biotecnologia das microalgas e sua contribuição para a sustentabilidade do planeta também são abordados.

PALAVRAS-CHAVE: Biotecnologia; Agricultura sustentável; Fertilidade do solo; Produtividade das plantas.

ABSTRACT: The evolution of modern agriculture towards microalgae applications involves crop production, wastewater bioremediation, and CO₂ bioremediation through the bioeconomy strategy. For this reason, this chapter will address recent contributions of microalgae in the agricultural and livestock sector, such as

in the production of biofertilizers and biostimulants, and a compilation of recent research reporting biomass productivity, dry biomass, and protein percentages of microalgae biomass. The definition of the best photobioreactor models available for the cultivation of dozens of species, and the optimal cultivation conditions are also presented. The status, trends, research progress, applicability, and existing gaps in the use of microalgae as wastewater bioremediators, carbon biofixers, and as biofertilizers in modern agriculture are discussed. Challenges facing microalgae biotechnology and its contribution to the sustainability of the planet are also addressed.

KEYWORDS: Biotechnology; Sustainable agriculture; Soil fertility; Plant productivity.

MICROALGAS NA AGRICULTURA

A agricultura moderna enfrenta o enorme desafio de aumentar a produção de forma sustentável para atender às demandas da crescente população mundial (Zhang et al., 2021). Nesse contexto, as microalgas são caracterizadas por diversas aplicações possíveis para promover a produtividade agrícola sustentável (Bello et al., 2021). Entretanto, a ausência de um procedimento universal para sua produção, os efeitos desconhecidos de cada espécie e a falta de estudos sobre o tempo ideal e o método de aplicação são obstáculos para sua ampla aplicação na agricultura (Gitau et al, 2022).

As microalgas são microrganismos flexíveis que podem ser produzidos sem o uso de recursos vitais para demandas humanas, como terras agricultáveis e água doce (Fernández et al., 2021). Algumas espécies de microalgas são mixotróficas, por isso podem ser cultivadas usando duas estratégias – autotroficamente ou heterotroficamente (Sol et al., 2008; de Mendonça et al., 2018). Atualmente, as microalgas mais estudadas são do gênero *Scenedesmus* e *Chlorella* (Morillas-España et al., 2022). *Arthrospira platensis* (spirulina), *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus obliquus* são conhecidos como mixotróficas (Zhai et al., 2017; de Souza et al., 2022).

Os sistemas de microalgas podem ser muito promissores para energia, custo e biorremediação de águas residuárias da criação de animais. Esses sistemas geram água limpa e produzem biomassa que podem ser utilizadas como biopesticidas e bioestimulantes que buscam estabelecer uma agricultura mais sustentável em uma abordagem bioeconomia circular (Ferreira et al., 2021). A demanda atual por bioestimulantes vegetais é impulsionada pelo rendimento e qualidade das culturas, bem como pela busca de uma agricultura sustentável moderna para proteger o meio ambiente e aumentar o consumo de produtos químicos agrícolas de origem biológica internacionalmente (Rupawalla et al., 2022).

O cultivo de microalgas inclui a recuperação do fósforo por captação de luxo e assimilação e recuperação de nitrogênio por assimilação em biomassa. Além disso, os produtos (biofertilizante, biocombustível, ração animal) estão ligados à menor dependência de fertilizantes sintéticos, menores emissões de gases de efeito estufa (GEE), segurança energética e fonte sustentável de ração rica em pigmentos e ácidos graxos essenciais

(Nagarajan et al., 2020).

As principais vantagens do processo de cultivo de microalgas são: crescimento rápido (Rawat et al., 2011; Schmitz et al., 2012); potencial para substituir fontes de proteína convencionais (por exemplo, farelo de soja, farelo de arroz, etc.); biomassa em ração animal (bovinos, aves e peixes) (Becker, 2007); não requer terra arável, portanto não concorre por espaço com produção de alimentos, remove o CO₂ do meio ambiente; e, algumas microalgas podem tratar águas residuárias agrícolas com alto potencial poluidor (Mulbry et al, 2008; Gong e Jiang, 2011; Schmitz et al., 2012).

PRODUÇÃO DE PROTEÍNAS MICROALGAS

O método mais convencional para produção de microalgas é o autotrófico (Fernández et al., 2021). O cultivo de microalgas autotróficas, mais especificamente fotoautotrófico, utiliza a luz como fonte de energia e carbono inorgânico do ar (Jiang et al., 2011; Franco et al., 2013). Biomassa e oxigênio são as saídas do sistema. Esse tipo de biomassa tem se mostrado útil para diversas aplicações, incluindo a biorremediação de águas residuárias (de Mendonça et al., 2018; Santos et al., 2021; Alvarez et al., 2021; Fernández et al., 2021; Ferreira et al., 2021). Já o mecanismo mixotrófico permite um efeito combinado durante o crescimento das microalgas, melhorando a produtividade da biomassa ao mesmo tempo em que trata as águas residuárias (Bhatnagar et al., 2011; de Mendonça et al., 2018; De Souza et al., 2022). Uma compilação de resultados abrangendo sete estudos sobre as culturas de microalgas com potencial para uso em biorremediação é apresentada na Tabela 1.

Segundo Fernández et al., (2021), o principal fator que afeta a velocidade da produção de microalgas é o fotobiorreator em que a biomassa é produzida, pois precisa ser construído para interceptar ou obter tão alta incidência de luz quanto viável e permitir o uso ideal pelas células. As condições fundamentais de cultura que devem ser gerenciadas corretamente incluem disponibilidade de nutrientes, temperatura, O₂ dissolvido e pH (Brindley et al., 2016; Song et al., 2019; Fernández et al., 2021). O controle do pH é necessário para manter a estabilidade do sistema biológico. Isso geralmente é realizado injetando gases ricos em CO₂, que fornece CO₂ e previne a limitação de carbono no sistema (Posadas et al., 2015; Fernández et al., 2021). Em situações de cultivo otimizadas, agitação e iluminação adequadas também são fatores importantes na produção de biomassa de microalgas, parâmetros de crescimento e biossíntese proteica (Priyadarshani et al., 2014). Com relação ao pH, a regulamentação da alcalinidade é necessária para evitar forte limitação inorgânica de carbono em consórcios de microalgas-bactérias para tratamento de águas residuárias, uma vez que uma condição de baixa alcalinidade resulta em crescimento limitado de microrganismos fotoautotróficos, como microalgas (Casagli et al., 2021; Oviedo et al., 2022).

Estudos recentes demonstraram que a forma, a fonte e a concentração de nitrogênio disponíveis no meio tiveram influência direta no teor proteico da biomassa de microalgas ou cianobactéria (Li et al., 2016; Markou et al., 2016; Shanthi et al., 2021; Ferreira et al., 2021). O perfil nutricional na biomassa é característico de cada espécie, além do meio cultural (Medeiros et al., 2020).

Substrato	Espécies de microalgas	OT (d)	COD (%)	QUE ₅ (%)	NH ₄ ⁺ (%)	P (%)	Referência
Águas residuárias de laticínio crus	<i>Ascochloris</i> sp.	7	95,1	NI	89,5	98,1	Kumar et al. (2019)
Águas residuárias de laticínio suplementadas com meio sintético	<i>C. reinhardtii</i>	10	76	NI	NI	87	Gramegna et al. (2020)
	<i>A. prototecoides</i>		65	NI	NI	77	
Águas residuárias de suinocultura	<i>Synechocystis</i> sp.	19	61,6 _(5,5)	NI	92,4 _(0,1)	90,1 _(0,0)	Ferreira et al. (2021)
	<i>Tetrademus obliquus</i>		73,1 _(3,3)	NI	87,5 _(0,4)	98,1 _(0,0)	
	<i>Prototecoides de chlorella</i>		68,4 _(2,2)	NI	92,0 _(0,0)	98,5 _(0,0)	
	<i>Chlorella vulgaris</i>		79,2 _(3,5)	NI	79,4 _(0,1)	98,6 _(0,3)	
Águas residuárias de gado anaerobicamente digeridas (ACWW)	<i>Arthrospira platensis</i> DHR 20	6	59,6 _(0,1)	NI	98 _(0,0)	92,4 _(0,03)	De Souza et al. (2022)
		7	72,3 _(1,2)	NI	100 _(0,0)	87,6 _(0,2)	
			63,6 _(0,5)	NI	98,6 _(0,02)	87,3 _(0,1)	
			73,6 _(0,01)	NI	100 _(0,0)	91,1 _(0,01)	
Águas residuárias de laticínio sintética tratadas por sistema de lodo ativado	<i>Scenedesmus obliquus</i> ACOI 204/07	7	74 _(1,1)	77 _(3,1)	100 _(0,0)	100 _(0,0)	De Mendonça et al. (2022)
		5	78 _(3,2)	81 _(1,2)	94 _(0,2)	74 _(2,4)	
	<i>Chlorella vulgaris</i>	9	50 _(0,2)	69 _(0,3)	100 _(0,0)	100 _(0,0)	
		5	60 _(0,1)	73 ₍₂₎	92 _(0,01)	61 _(2,5)	
Água de processamento de leite (MPWW)	<i>Chlorella vulgaris</i>	28	NI	89,53-92,40	92,94-94,54	75,09-78,78	Verma et al. (2022)
Média		11,6 _(6,8)	71,1 _(11,3)	78,2 _(8,4)	93,4 _(6,4)	88,5 _(10,9)	Presente estudo

BOD₅ – demanda bioquímica de oxigênio; COD – demanda química de oxigênio; NH₄⁺ - amônio; NI – não informado; OT – tempo de operação; P – fósforo solúvel; Valores entre parênteses indicam desvio padrão; Valores que não são seguidos por números subscritos entre parênteses do não tiveram seus desvios padrões identificados nos artigos citados.

Tabela 1 Potencial de biorremediação de culturas mixotróficas, heterotróficas e fotoautotróficas de microalgas

Os cultivos de microalgas voltados para a produção de proteínas devem evitar a limitação do nitrogênio, uma vez que o meio com limitação de nitrogênio apresenta condições

favoráveis para a conversão da proteína disponível em carboidratos (Sassano et al., 2010; Shanthi et al., 2021). É importante destacar que o teor de proteínas nas células aumenta até uma concentração de nitrogênio particular e após um certo ponto o teor de proteína diminui, provavelmente devido à maior concentração de nitrogênio que diminui sua taxa de assimilação (Markou et al., 2011; Shanthi et al., 2021). A proteína das algas é considerada de boa qualidade para alimentos e ração, considerada superior a alguns materiais vegetais e cereais (trigo, feijão e arroz), porém, de menor qualidade em comparação com proteínas animais (Matos et al., 2017; Medeiros et al., 2020).

Muitos compostos comercialmente úteis são encontrados naturalmente em microalgas, incluindo uma variedade de proteínas, carboidratos, lipídios, vitaminas, minerais, antioxidantes, fibras e biomassa nutricional (Batista et al., 2013; Matos et al., 2017; Fields et al., 2020; Medeiros et al., 2020; Sproles et al., 2021). Por outro lado, os metais pesados também podem ser acumulados por microalgas (Hussain et al., 2021). No entanto, Lorentz et al. (2020) encontraram metais em biomassa de microalgas abaixo dos valores especificados pela norma brasileira CONAMA Resolução 375 (Brasil, 2006).

Dados sobre concentração de proteínas, produtividade e biomassa seca de diferentes espécies de microalgas cultivadas em diferentes substratos são apresentados na Tabela 2. O padrão de resultados apresentado pelos artigos científicos sobre a produção de microalgas não está bem definido. Isso é evidenciado pela quantidade de dados não informados em alguns artigos e relatados ou com dados para o cálculo disponível em outros artigos citados nas Tabelas 1 e 2.

Espécies de microalgas	Substrato	Reator	Luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Produção volumosa de biomassa ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Biomassa Seca (g L^{-1})	Produtividade proteica ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Produção de proteínas (%)	Referência
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Águas residuárias de gado	PBR	58	0,213-0.358	3,22 - 3.7*	0,068-0,150	32-42	Mendonça et al (2018)
<i>Arthrospira platensis</i> DHR 20	Águas residuárias de gado	HPBR	265	0,664 _(0,06)	7,15 _(0,08)	0,299 _(0,02)	≈ 45	De Souza et al (2022)
				0,572 _(0,1)	6,3 _(0,1)	0,244 _(0,01)	≈ 43	
				0,524 _(0,08)	6,5 _(0,1)	0,232 _(0,01)	≈ 44	
				0,610 _(0,18)	6,6 _(0,2)	0,260 _(0,03)	≈ 42	
<i>Synechocystis</i> sp.				0,0237 _(0,0026)	≈ 0,4503	≈ 0,011	47,3 _(2,5)	
<i>Tetrademus obliquus</i>	Águas residuárias de Piggyery	PBR	53	0,0316 _(0,0)	≈ 0,6004	≈ 0,011	34,5 _(2,1)	Ferreira et al (2021)
<i>Protocoides de chlorella</i>				0,0368 _(0,0079)	≈ 0,6992	≈ 0,013	34,4 _(0,8)	
<i>Chlorella vulgaris</i>				0,0224 _(0,0039)	≈ 0,4256	≈ 0,009	38,3 _(0,9)	

Espécies de microalgas	Substrato	Reator	Luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Produção volumosa de biomassa ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Biomassa Seca (g L^{-1})	Produtividade proteica ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Produção de proteínas (%)	Referência
<i>Artrospira platensis</i>	Controle (0,0%)	Frasco de Erlenmeyer	32,4	0,094	0,075	NI	60	Shanthy et al (2021)
	Resíduos de peixes (0,1%)			$\approx 0,05$	$\approx 0,044$	NI	26	
	Resíduos de peixe (0,3%)			0,126	0,096	NI	55	
	Resíduos de peixes (0,5%)			0,131	0,1	NI	69	
	Resíduos de peixe (0,7%)			0,113	0,088	NI	70	
	Resíduos de peixes (1,0%)			0,118	0,09	NI	64	
<i>Lagerheimia longiseta</i> (cepa: D133WC)	Meio de Controle	Fracos	83,250	0,03433	0,515 _(0,00104)	NI	44,96 _(0,78)	Medeiros et al (2020)
	Biocosposto horticultural			0,03373	0,506 _(0,00175)	NI	59,15 _(0,94)	
<i>Contortum de monorafidium</i> (cepa: D173WC)	Meio de Controle	Fracos	83,250	0,02529	0,43 _(0,0012)	NI	55,45 _(0,41)	
	Biocosposto horticultural			0,02235	0,38 _(0,0009)	NI	55,76 _(1,72)	
<i>Scenedesmus quadricauda</i> (cepa: D125WC)	Meio de Controle	Fracos	83,250	0,0194	0,291 _(0,00085)	NI	53,58 _(0,03)	
	Biocosposto horticultural			0,01653	0,248 _(0,00136)	NI	49,08 _(0,59)	

HRP: Lagoa de alta taxa; HPBR: Cultivado em Fotobioreatores Horizontais; PBR: Fotobioreator; SBR: Reator de lote de sequenciamento; NI: não informado; \approx : Aproximadamente; *: Produtividade média / Regime de luz contínua; **: 12 h fotoperíodo escuro/claro; Valores entre parênteses indicam desvio padrão; Valores que não são seguidos por números entre parênteses do não têm seus desvios padrões identificados nos artigos citados.

Tabela 2 Concentração de proteínas (%) e produtividade ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$) e biomassa seca (g L^{-1}) em culturas de microalgas

AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DAS PLANTAS

Microalgas são microrganismos capazes de transformar substâncias inorgânicas (por exemplo, CO_2 e NO_3^-) em substâncias orgânicas (por exemplo, carboidratos e proteínas) com alta eficiência (de Moraes et al., 2019; Qie et al., 2019). Sua biomassa pode aumentar o crescimento das plantas atuando como um fertilizante orgânico e de liberação lenta para fornecer nutrientes, assimilados do tratamento de águas residuárias, e manter solos e corpos de água livres de contaminação com cargas severas de nutrientes (Coppens et al., 2016; Alvarez et al., 2021; Ferreira et al., 2021).

A biomassa de microalgas tem altos níveis de aminoácidos que fornecem efeitos

benéficos para as plantas (Michalak et al., 2015). Microalgas também contêm hormônios vegetais que funcionam como promotores do crescimento vegetal. As auxinas, por exemplo, melhoram substancialmente o desenvolvimento radicular, melhorando assim a capacidade da planta de absorver nutrientes e água do solo e levá-los a maior tolerância a condições adversas de estresse (Stirk et al., 2002). As microalgas também funcionam como um biopesticida, protegendo as plantas contra patógenos como fungos ou bactérias (Fernández et al., 2021).

Estudos científicos já mostraram que polissacarídeos (carboidratos) de microalgas promovem a absorção de nutrientes, o crescimento das plantas e a tolerância ao estresse (El-Naggar et al., 2020; EL Arroussi et al., 2018; Farid et al., 2019; Ferreira et al., 2021). A Tabela 3 apresenta uma compilação de informações de pesquisas recentes que registram os benefícios e efeitos do uso da biomassa microalgas para o cultivo de plantas.

Um experimento identificou que é mais vantajoso para o crescimento do cultivo, incluindo maior número de ramos e flores, quando os tratamentos com biofertilizantes são aplicados 22 dias antes do transplante de mudas em comparação com o grupo sem biofertilizante (controle) e os tratamentos biofertilizantes aplicados no momento do transplante. Isso mostra que a biomassa precisa ser mineralizada para estar prontamente disponível para captação de plantas (Garcia-Gonzalez e Sommerfeld, 2016).

Espécies de microalgas	Planta de cultura	Aplicação	Tipo de estudo	Efeito	Referência
<i>Acutodesmus dimorphus</i>	Tomate roma (<i>S. lycopersicum</i> var. Roma)	Extratos de microalgas	Laboratório	Efeitos positivos na germinação de sementes, crescimento das plantas, quantidade de flores e desenvolvimento de frutas	Garcia-Gonzalez e Sommerfeld (2016)
		Biomassa de algas verdes secas	Estufa		
MC1 ¹ : espécies de <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Clorococcum</i> e <i>Chroococcus</i> .	Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) variedade HD2966	Biomassa de microalgas seca	Crescimento da cultura em experimentos com maconha	Efeito significativo sobre o teor de nitrogênio, fósforo e potássio de raízes, brotos e grãos	Renuka et al. (2016)
MC2 ² : espécies de <i>Phormidium</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Westiellopsis</i> , <i>Fischerella</i> e <i>Spirogyra</i> .	Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.) variedade HD2967	Biomassa de microalgas seca			
MaB ³	Tomate	Biomassa de microalgas seca	Estufa	Melhora no peso seco da planta, Aumento N, P em folhas, e açúcares/ carotenoides em frutas em comparação com fertilizante Controles	Coppens et al. (2016)
<i>Nannochloropsis oculata</i>					

Espécies de microalgas	Planta de cultura	Aplicação	Tipo de estudo	Efeito	Referência
Mix: <i>Scenedesmus</i> sp. e <i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Uruchloa brizantha</i> (Marandu)	Biomassa de microalgas	Campo	O tratamento biológico apresentou produtividade vegetal semelhante em relação ao tratamento com fertilizante químico convencional, além de maior teor de matéria seca.	Lorentz et al. (2020)
<i>Synechocystis</i> sp. <i>Tetradesmus obliquus</i> <i>Protococoides de chlorella</i> <i>Chlorella vulgaris</i>	Pepino (<i>Pepino sativus</i>); Cevada (<i>Hordeum vulgare</i>); Trigo (<i>Triticum aestivum</i>); Soja (<i>Glycine max</i>); Agrião (<i>Nasturium officinale</i>); Tomate (<i>Licopersicon esculentum</i>)	Solução de cultura de microalgas	Laboratório	Maior valor do índice de germinação em relação ao controle (água destilada); O efeito positivo no crescimento das raízes das plantas, com comprimentos superiores ao controle, e o efeito sobre os brotos de plantas não foi significativo.	Ferreira et al. (2021)

¹MC1: formulação com microalgas unicelular (espécies de *Chlorella* spp., *Scenedesmus* spp., *Clorococcum* spp., *Chroococcus* spp.);

²MC2: formulação com microalgas filamentosas (espécies de *Phormidium* spp., *Anabaena* spp., *Westielloopsis* spp., *Fischerella* spp., *Spirogyra* spp.);

³MaB: flocos bacterianos e de microalgas.

Tabela 3 Plantas cultivadas com microalgas e seus benefícios

Convergindo com esse argumento, Lorentz et al. (2020) observaram maior conteúdo de cinzas de *Uruchloa brizantha* cv. Marandu no tratamento químico de seu experimento e atribuíram esse resultado à probabilidade de os minerais presentes em fertilizantes químicos estarem mais facilmente disponíveis para as plantas em comparação com o tratamento de biomassa de microalgas. Considerando que o biofertilizante de microalgas é um bioproduto orgânico, ele precisa de tempo para mineralizar suas substâncias (por exemplo, proteínas, aminoácidos, carboidratos etc.) e disponibilizá-las para absorção de plantas (por exemplo, NH_4^+ , NO_3^- , P_2O_5 , K_2O). Isso demonstra que o tempo de aplicação de biofertilizantes de microalgas deve ser amplamente estudado para garantir os benefícios desse bioproduto.

O teor mineral de cálcio, ferro, potássio, magnésio, manganês e fósforo no espinafre tratado com algas de água doce, *Chlorella fusca*, foi maior em comparação com o não tratado (Kim et al., 2018). O mesmo estudo concluiu que o rendimento da cebolinha chinesa tratada com a mesma microalga foi 18,3% maior do que o não tratado. Seus resultados indicaram que os fertilizantes de microalgas são bioestimulantes eficientes e econômicos para melhorar o crescimento das plantas e a qualidade da cebolinha chinesa e do espinafre na fazenda orgânica estudada.

Portanto, é possível dizer que o uso de biofertilizantes de microalgas aumentam o crescimento das plantas, a produtividade da cultura e/ou rendimento de trigo, tomate, cebolinha, espinafre, arroz, milho e alface em comparação com a dose recomendada de fertilizantes convencionais (por exemplo, fertilizante combinado de nitrogênio, fósforo e potássio conhecido como NPK) e/ou tratamento de controle (sem fertilizantes) (Renuka et al., 2016; Garcia-Gonzalez e Sommerfeld, 2016; Kim et al., 2018; Wang et al., 2018; Dineshkumar et al., 2019; Puglisi et al., 2020).

BIOFIXAÇÃO DE CO₂

As microalgas convergem com a sustentabilidade da captura de carbono, especialmente através da transformação do CO₂ em O₂, e como o CO₂ e luz solar atmosférica podem ser utilizadas para o crescimento de microalgas, o cultivo da biomassa é considerado sustentável (Fernández et al., 2021). Durante a fotossíntese, as microalgas fixam CO₂ em monossacarídeos ou polissacarídeos, como fonte primária de energia e como materiais estruturais e de armazenamento, respectivamente. Esta capacidade de sequestro de CO₂ é uma nova abordagem para reduzir a quantidade de CO₂ na atmosfera (Hussain et al., 2021).

Entre as várias técnicas de captura de CO₂, a biofixação microalgal por fotossíntese é uma tecnologia promissora devido à eficiência desses microrganismos na transformação desse gás em compostos orgânicos, utilizando-o como nutriente no meio da cultura (De Moraes et al., 2019). Além disso, o processo de captura e armazenamento de carbono (CCS) realizado por microalgas e cianobactérias é considerado uma biocaptura de CO₂ mais eficiente em comparação com outras tecnologias como absorção, adsorção, criogenia e separação por membranas (Fernández et al., 2021).

Embora as microalgas tenham a vantagem de converter CO₂ em biomassa, a eficiência do processo é uma questão crítica em comparação com as tecnologias convencionais. A otimização dos métodos de cultivo de microalgas pode intensificar o desempenho de fixação de CO₂ e reduzir a toxicidade de soluções alcalinas (Song et al., 2019). De acordo com Bose et al. (2022), seria necessário uma alta alcalinidade (pH>10 e alcalinidade entre 1,7 gIC L⁻¹ e 2,1 gIC L⁻¹) para garantir uma boa remoção de CO₂ (acima de 97%). Para melhorar a recuperação do CO₂, é necessária uma seleção de microalgas alcalófilas de crescimento rápido. Até o momento, a melhor espécie de microalgas fixadora de CO₂ descrita na literatura atual é *A. platensis* (de Mendonça et al., 2022).

O estabelecimento do cultivo de microalgas em sistemas de águas residuárias pode levar ao decréscimo ou mesmo neutralização a do impacto da biorremediação de águas residuárias no que diz respeito ao consumo de energia e liberação de GEE, como o CO₂, ao meio ambiente (Ácien et al., 2016; Fernández et al., 2021). De Mendonça et al. (2022) realizaram uma análise de balanço de massa para estimar a produção de

biomassa microalgal em uma planta leiteira de médio porte brasileira com produção anual de 328.500.000L de águas residuárias e uma biofixação de 167,54 t^{ano-1} de CO₂. Considerando a produção de biomassa de 2,3 g L⁻¹ e o teor de 56% das proteínas em conta, é possível estimar que a quantidade de biofertilizante produzido pelo tratamento desse esgoto leiteiro com microalgas seria de 423,1 t^{ano-1}. O volume anual de leite produzido no Brasil gera aproximadamente 100,2 bilhões de litros de águas residuárias leiteiras (Rocha et al., 2020; De Mendonça et al., 2022), que poderia atingir a produção de 129.057,6 t^{ano-1} de biofertilizantes.

BIOECONOMIA DE MICROALGAS

Atualmente, a biotecnologia microalgal está ajudando a bioeconomia global, produzindo biomassa de alto valor para aplicações relacionadas ao ser humano, como alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos (Bhalamurugan et al., 2018; Magalhães et al., 2021). No âmbito da bioeconomia circular, as microalgas podem recuperar os nutrientes provenientes de águas residuárias da produção de animais de volta ao solo na produção agrícola, ser fonte de biocombustíveis, gerar mais renda para as instalações produtivas (Ferreira et al., 2018; Ferreira et al., 2021; Alvarez et al., 2021) e avançar a bioeconomia circular na indústria hídrica por meio da valorização de bioprodutos de microalgas (Arashiro et al., 2022).

Agricultores e consumidores estão dispostos a produzir e consumir produtos seguros e orgânicos. No entanto, o mercado de bioestimulantes de microalgas carece de credibilidade e não está bem estabelecido devido à falta de procedimentos operacionais padrões para produzir os produtos biológicos, poucas patentes, dificuldade em reproduzir resultados de laboratório em campo e gargalos no comércio internacional devido a regulamentações mais rigorosas e complexas que variam entre países, entre outras questões (Kapoor et al., 2021). Pesquisas indicam que o uso exclusivo de biofertilizantes de microalgas ainda não é economicamente viável. Pesquisas têm relatado que o custo-benefício é maior com a mistura de biofertilizantes de microalgas com fertilizantes químicos (Silambarasan et al., 2021; Nayak et al., 2019).

PERSPECTIVAS E DESAFIOS FUTUROS

Pesquisas mostram que o uso de biofertilizantes de microalgas são positivos para a produtividade das culturas, o crescimento das plantas e sua produtividade. No entanto, os déficits tecnológicos e de conhecimento existentes restringem sua ampla aplicação e integração nas práticas agrícolas (Alvarez et al., 2021). Um grande desafio para o uso de microalgas na agricultura moderna é a identificação de potenciais combinações de espécies microalgas e espécies com efeitos positivos no crescimento e produtividade das plantas em estudos de campo com diferentes tipos de culturas agrícolas em diferentes

regiões edafoclimáticas. Pesquisas sobre a forma (por exemplo, biomassa fresca ou seca), tempo de aplicação e mineralização da biomassa de microalgas para estar disponível para captação de plantas também são indispensáveis para o avanço do uso de biofertilizantes de microalgas. É igualmente importante esclarecer quais nutrientes e micronutrientes estão presentes na biomassa microalgas e em quais quantidades, para estimar a contribuição desse bioproduto para plantas e solos em áreas agrícolas.

As biorrefinarias serão essenciais para o desenvolvimento de bioprodutos de microalgas sustentáveis e economicamente competitivos no futuro (Russell et al., 2022). Essas construções têm potencial para proporcionar mitigação de impactos ambientais (por exemplo, biofixação de CO₂, biorremediação de águas residuárias); reduzir os gastos com propriedades agrícolas, reduzir a necessidade de tratamentos convencionais de águas residuárias que requerem equipamentos e insumos caros; produzir bioprodutos em escala comercial e ser uma fonte adicional de renda para os produtores rurais.

CONCLUSÕES

O uso da biomassa de microalgas como biofertilizante reduz a poluição ambiental e pode melhorar a bioeconomia do processo de adequação da fertilidade do solo em comparação com os fertilizantes convencionais. As microalgas são agentes promissores a serem utilizados tanto na produção de biofertilizantes quanto na biorremediação de águas residuárias. O potencial de biorremediação dos cultivos mixotróficos, heterotróficos e fotoautotróficos de microalgas é demonstrado nas remoções médias de COD (71,1%), BOD₅ (78,2%), NH₄⁺ (93,4%) e P (88,5%) encontrados conforme dados dos artigos citados. Para ampliar o uso de biofertilizantes de microalgas e explorar plenamente o potencial sustentável das microalgas, é necessário continuar os esforços de pesquisa e o desenvolvimento de parcerias entre a academia-indústria para acelerar o processo.

AGRADECIMENTOS

O estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - financiador de bolsas e financiador: FAPERJ processo nº E-26/210.807/2021.

REFERÊNCIAS

Ácien, F.G., Gómez-Serrano, C., Morales-Amaral, M.M., Fernández-Sevilla, J.M., Molina-Grima, E. (2016). Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? Applied Microbiology and Biotechnology, v.100, p. 9013 - 9022, 2016.

- Alvarez, A.L., Weyers, S.L., Goemann, H. M., Peyton, B. M., Gardner, R. D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, v. 54, 102200, 2021.
- Arashiro, L.T.; Josa, I.; Ferrer, I.; Van Hulle, S.W.H.; Rousseau, D.P.L.; Garfi, M. (2022). Life cycle assessment of microalgae systems for wastewater treatment and bioproducts recovery: Natural pigments, biofertilizer and biogas, *Science of The Total Environment*, Volume 847, 2022, 157615, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157615>.
- Batista, A.P., Gouveia, L., Bandarra, N.M., Franco, J.M., Raymundo, A. (2013). Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Research*, v. 2, n. 2, 164–173, 2013.
- Becker, E.W. (2007). Micro-algae as a source of protein, *Biotechnology Advances*, 25 (2), 2007, p. 207-210, ISSN 0734-9750, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>.
- Bello, A.S., Saadaoui, I., Ben-Hamadou, R. (2021). “Beyond the Source of Bioenergy”: Microalgae in Modern Agriculture as a Biostimulant, Biofertilizer, and Anti-Abiotic Stress. *Agronomy*, v. 11, n. 8, 2021.
- Bhalamurugan, G.L., Valerie, O., Mark, L. (2018). Valuable bioproducts obtained from microalgal biomass and their commercial applications: a review. *Environmental Engineering Research*, v.23, n. 3, p. 229-241, 2018.
- Bhatnagar, A., Chinnaamy, S., Singh, M., Das, K.C. (2011). Renewable biomass production by mixotrophic algae in the presence of various carbon sources and wastewaters. *Applied Energy*, v. 88, p. 3425–3431, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.064>.
- Bose, A., O’Shea, R., Lin, R., Murphy, J.D. (2022). Optimisation and performance prediction of photosynthetic biogas upgrading using a bubble column, *Chemical Engineering Journal*, Volume 437, Part 1, 2022, 134988, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134988>.
- Brasil (2006). Ministério do Meio Ambiente (MMA). Resolução N° 375 de 29 de agosto de 2006. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF (30 ago. 2006).
- Brindley, C., Jiménez-Ruiz, N., Acien, F.G., Fernández-Sevilla, J.M. (2016). Light regime optimization in photobioreactors using a dynamic photosynthesis model. *Algal Research*, v. 16, p. 399 – 408, 2016.
- Casagli, F., Rossi, S., Steyer, J.P., Bernard, O., Ficara, E. (2021). Balancing microalgae and nitrifiers for wastewater treatment: can inorganic carbon limitation cause an environmental threat? *Environ. Sci. Technol.* 55 (2021) 3940–3955, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05264>.
- Coppens, J., Grunert, O., Van Den Hende, S., Vanhoutte, I., Boon, N., Haesaert, G., Gelder, L.D. (2016). The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *J Appl Phycol* 28, 2367–2377 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0775-2>.
- De Mendonça, H.V., Otenio, M.H., Marchão, L., Lomeu, A., De Souza, D.S., Reis, A. (2022). Biofuel recovery from microalgae biomass grown in dairy wastewater treated with activated sludge: The next step in sustainable production, *Science of The Total Environment*, Volume 824, 2022, 153838, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153838>.

- De Mendonça, H.V., Ometto, J.P.H.B., Otenio, M.H., Marques, I.P.R., Reis, A.J.D. (2018). Microalgae-mediated bioremediation and valorization of cattle wastewater previously digested in a hybrid anaerobic reactor using a photobioreactor: comparison between batch and continuous operation. *Science of the Total Environment*, v. 633, p. 1-11, 2018.
- De Morais, M.G., De Morais, E.G., Duarte, J.H., Deamici, K.M., Mitchell, B.G., Costa, J.A.B. (2019). Biological CO₂ mitigation by microalgae: technological trends, future prospects and challenges. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 35, a.n. 78, 2019.
- De Souza, D.S., Valadão, R.C., De Souza, E.R.P., Barbosa, M.I.M.J., De Mendonça, H.V. (2022). Enhanced *Arthrospira platensis* Biomass Production Combined with Anaerobic Cattle Wastewater Bioremediation. *Bioenerg. Res.* 15, 412–425 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10258-4>.
- Dineshkumar, R., Subramanian, J., Gopalsamy, J., Jayasingam, P., Arumugam, A., Kannadasan, S., Sampathkumar, P. (2019). The Impact of Using Microalgae as Biofertilizer in Maize (*Zea mays* L.). *Waste Biomass Valor* 10, 1101–1110 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>.
- El-Naggar, N.E.A., Hussein, M.H., Shaaban-Dessuuki, S.A., Dalal, S.R. (2020). Production, extraction and characterization of *Chlorella vulgaris* soluble polysaccharides and their applications in AgNPs biosynthesis and biostimulation of plant growth. *Scientific Reports*, v. 10, p. 1–19, 2020.
- El Arroussi, H., Benhima, R., Elbaouchi, A., Sijilmassi, B., El Mernissi, N., Aafsar, A., Meftah-Kadmiri, I., Bendaou, N., Smouni, A. (2018). *Dunaliella salina* exopolysaccharides: a promising biostimulant for salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Applied Phycology*, v. 30, p. 2929–2941, 2018.
- Farid, R., Mutale-Joan, C., Redouane, B., Mernissi Najib, E., Abderahime, A., Laila, S., Ar-Roussi Hicham, E. (2019). Effect of microalgae polysaccharides on biochemical and metabolomics pathways related to plant defense in *Solanum lycopersicum*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 188, p. 225–240, 2019.
- Fernández, F.G.A., Reis, A., Wijffels, R.H., Barbosa, M., Verdelho, V., Llamas, B. (2021). The role of microalgae in the bioeconomy. *New Biotechnology*, v. 61, p. 99-107, 2021.
- Ferreira, A., Melkonyan, L., Carapinha, S., Ribeiro, B., Figueiredo, D., Avetisova, G., Gouveia, L. (2021). Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environmental Advances*, v. 4, 2021.
- Ferreira, A., Marques, P., Ribeiro, B., Assemany, P., De Mendonça, H.V., Barata, A., Oliveira, A.C., Reis, A., Pinheiro, H.M., Gouveia, L. (2018). Combining biotechnology with circular bioeconomy: from poultry, swine, cattle, brewery, dairy and urban wastewaters to biohydrogen. *Environmental Research*, v. 164, p. 32–38, 2018.
- Fields, F.J., Lejzerowicz, F., Schroeder D., Ngoi, S.M., Tran, M., McDonald, D., Jiang, L., Chang, J.T., Knight, R., Mayfield, S. (2020). Effects of the microalgae *Chlamydomonas* on gastrointestinal health. *Journal of Functional Foods*, v. 65, 2020.
- Franco, A. L. C., Lôbo, I. P., Cruz, R. S. Da, Teixeira, C. M. L. L., Almeida Neto, J. A. De, Menezes, R. S. (2013). Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. *Química Nova*, 36(3), 437–448, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000300015>.

- Garcia-Gonzalez, J., Sommerfeld, M. (2015). Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*, J. Appl. Phycol. 28 (2015) 1051–1061, <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>.
- Gitau, M.M., Farkas, A., Ördög, V., Maróti, G. (2022). Evaluation of the biostimulant effects of two Chlorophyta microalgae on tomato (*Solanum lycopersicum*), Journal of Cleaner Production, Volume 364, 2022, 132689, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132689>.
- Gong, Y., Jiang, M. (2011). Biodiesel production with microalgae as feedstock: from strains to biodiesel. Biotechnol Lett 33, 1269–1284 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10529-011-0574-z>.
- Gramegna, G., Scortica, A., Scafati, V., Ferella, F., Gurrieri, L., Giovannoni, M., Bassid, R., Sparlac, F., Mattei, B., Benedetti, M. (2020). Exploring the potential of microalgae in the recycling of dairy wastes. Bioresource Technology Reports, 12, 100604, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100604>.
- Hussain, F., Shah, S.Z., Ahmad, H., Abubshait, S.A., Abubshait, H.A., Laref, A., Manikandan, A., Kusuma, H.S., Iqbal, M. (2021). Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 137, 2021.
- Jiang, L., Luo, S., Fan, X., Yang, Z., Guo, R. (2011). Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂. Applied Energy, 88 (10), 2011, p.3336-3341, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.043>.
- Kapoore, R. V., Wood, E. E., & Llewellyn, C. A. (2021). Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. Biotechnology Advances, Volume 49, 2021, 107754, ISSN 0734-9750, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107754>.
- Kim, M.J., Shim, C.K., Kim, Y.K., Ko, B.G., Park, J.H., Hwang, S.G., Kim, B.H. (2018). Effect of biostimulator *Chlorella fusca* on improving growth and qualities of Chinese chives and spinach in organic farm, Plant Pathol. J. 34 (2018) 567–574, <https://doi.org/10.5423/PPJ.FT.11.2018.0254>.
- Kumar, A. K., Sharma, S., Shah, E., Parikh, B. S., Patel, A., Dixit, G., Gupta, S., Divecha, J. M. (2019). Cultivation of *Ascochlorella* sp. ADW007-enriched microalga in raw dairy wastewater for enhanced biomass and lipid productivity. International Journal of Environmental Science and Technology, 16, 943–954 (2019).
- Li, T., Xu, J., Gao, B., Xiang, W., Li, A., Zhang, C. (2016). Morphology, growth, biochemical composition, and photosynthetic performance of *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae) under low and high nitrogen supplies. Algal Research, v. 16, p. 481-491, 2016.
- Lorentz, J.F., Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Alves, W.S., Pereira, O.G. (2020). Microalgal biomass as a biofertilizer for pasture cultivation: Plant productivity and chemical composition. Journal of Cleaner Production, v. 276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124130>.
- Magalhães, I. B., Ferreira, J., De Siqueira Castro, J., Assis, L. R. De, Calijuri, M. L. (2021). Technologies for improving microalgae biomass production coupled to effluent treatment: A life cycle approach. Algal Research, 57, 102346, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102346>.
- Matos, J., Cardoso, C., Bandarra, N.M., Afonso, C. (2017). Microalgae as healthy ingredients for functional food: A review. Food & Function, v. 8, n. 8, 2017.

- Markou, G., Iconomou, D., Muylaert, K. (2016). Applying raw poultry litter leachate for the cultivation of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, v. 13, p.79-84, 2016.
- Markou, G., Georgakakis, G. (2011). Cultivation of filamentous cyanobacteria (bluegreen algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: a review. *Applied Energy*, v. 88, n. 10, p. 3389-3401, 2011.
- Medeiros, V.P.B, Pimentel, T.C., Varandas, R.C.R., Santos, S.A., Pedrosa, G.T.S., Sassi, C.F.C., Conceição, M.M., Magnani, M. (2020). Exploiting the use of agro-industrial residues from fruit and vegetables as alternative microalgae culture médium. *Food Research International*, v. 137, 2020.
- Michalak, I., Chojnacka K. (2015). Algae as production systems of bioactive compounds. *Engineering in Life Sciences*, v. 15, p. 160 – 76, 2015.
- Morillas-España, A., Lafarga, T., Sánchez-Zurano, A., Ación-Fernández, F.G., González-López, C. (2022). Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: Current needs and challenges, *Chemosphere*, Volume 291, Part 3, 2022, 132968, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>.
- Mulbry, W., Kondrad, S., Pizarro, C., Kebede-Westhead, E. (2008). Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers, *Bioresource Technology*, 99 (17), 2008, Pages 8137-8142, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.073>.
- Nagarajan, D., Lee, D.-J., Chen, C.-Y., Chang, J.-S. (2020). Resource recovery from wastewaters using microalgae-based approaches: A circular bioeconomy perspective. *Bioresource Technology*, 122817, 2020.
- Nayak, M., Swain, D. K., & Sen, R. (2019). Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.) crop. *Science of The Total Environment*, 682, 475-484.
- Oviedo, J.A, Muñoz, R., Donoso-Bravo, A., Bernard, O., Casagli, F., Jeison, D. (2022). A half-century of research on microalgae-bacteria for wastewater treatment, *Algal Research*, Volume 67, 2022, 102828, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102828>.
- Panagopoulos, A. (2022). Brine management (saline water & wastewater effluents): Sustainable utilization and resource recovery strategy through Minimal and Zero Liquid Discharge (MLD & ZLD) desalination systems, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 176, 2022, 108944, ISSN 0255-2701, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108944>.
- Panagopoulos, A. (2021). Beneficiation of saline effluents from seawater desalination plants: Fostering the zero liquid discharge (ZLD) approach - A techno-economic evaluation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9 (4), 2021, 105338, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105338>.
- Patel A., Matsakas L., Rova U., Christakopoulos P. (2019). A perspective on biotechnological applications of thermophilic microalgae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*, v. 278, p. 424–34, 2019.
- Posadas E., Morales M. Del M., Gomez, C., Ación, F.G., Muñoz R. (2015). Influence of pH and CO₂ source on the performance of microalgae-based secondary domestic wastewater treatment in outdoors pilot raceways. *Chemical Engineering Journal*, v. 265, p. 239–248, 2015.

Priyadarshani, I., Rath, B., Thajuddin, N. (2014). Influence of aeration and light on biomass production and protein content of four species of marine cyanobacteria. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 3, n. 12, p. 173 - 182, 2014.

Puglisi, I., La Bella, E., Rovetto, E.I., Lo Piero, A.R., Baglieri, A. (2020). Biostimulant effect and biochemical response in lettuce seedlings treated with a *Scenedesmus quadricauda* extract, *Plants* 9 (1) (2020) 123, <https://doi.org/10.3390/plants9010123>.

Qie, F., Zhu, J., Rong, J., Zong, B. Biological removal of nitrogen oxides by microalgae, a promising strategy from nitrogen oxides to protein production, *Bioresource Technology*, Volume 292, 2019, 122037, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122037>.

Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T., Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Renew. Energy*, v. 88, p. 3411-3424, 2011.

Renuka, N., Prasanna, R., Sood, A., Ahluwalia, A. S., Bansal, R., Babu, S., Singh, R., Shivay, Y. S. & Nain, L. (2016) Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 6608–6620. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5884-6>.

Rocha, D.T., Carvalho, G.R., Resende, J.C. (2020). Cadeia produtiva do leite no Brasil: produção primária. *Embrapa, Circ. Técn.* 123. ISSN 1678-037X. 16p.

Russell, C., Rodriguez, C., Yaseen, M. (2022). High-value biochemical products & applications of freshwater eukaryotic microalgae, *Science of The Total Environment*, Volume 809, 2022, 151111, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151111>.

Rupawalla, Z., Shaw, L., Ross, I.L., Schmidt, S., Hankamer, B., Wolf, J. (2022). Germination screen for microalgae-generated plant growth biostimulants, *Algal Research*, Volume 66, 2022, 102784, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102784>.

Santos, M.G.B, Duarte, R.L., Maciel, A.M., Abreu, M., Reis, A., Mendonça, H.V. (2021). Microalgae Biomass Production for Biofuels in Brazilian Scenario: A Critical Review. *BioEnergy Research*, v.14, p. 23–42, 2021.

Sassano, C.E.N., Gioielli, L.A., Ferreira, L.S., Rodrigues, M.S., Sato, S.C.A., Carvalho, J.C.M. (2010). Evaluation of the composition of continuously-cultivated *Arthrospira (Spirulina) platensis* using ammonium chloride as nitrogen source. *Biomass and Bioenergy*, v. 34, n. 12, p. 1732-1738, 2010.

Schmitz, R., Magro, C., Colla, L. (2012). Aplicações Ambientais de Microalgas. *Revista CIATEC-UPF*, 4(1), 48-60, 2012. <https://doi.org/10.5335/ciatec.v4i1.2393>.

Shanthy, G., Premalatha, M., Anantharaman, N. (2021). Potential utilization of fish waste for the sustainable production of microalgae rich in renewable protein and phycocyanin-*Arthrospira platensis*/ *Spirulina*. *Journal of Cleaner Production*, 294, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126106>.

Silambarasan, S., Logeswari, P., Sivaramakrishnan, R., Incharoensakdi, A., Cornejo, P., Kamaraj, B. & Chi, N. T. L. (2021) Removal of nutrients from domestic wastewater by microalgae coupled to lipid augmentation for biodiesel production and influence of deoiled algal biomass as biofertilizer for *Solanum lycopersicum* cultivation, *Chemosphere*, Volume 268, 129323, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129323>.

Song, C., Liu, Q., Qi, Y., Chen, G., Song, Y., Kansha, Y., Kitamura, Y. Absorption-microalgae hybrid CO₂ capture and biotransformation strategy—A review, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 88, 2019, Pages 109-117, ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.06.002>.

Sproles, A. E., Fields, F. J., Smalley, T. N., Le, C. H., Badary, A., Mayfield, S. P. Recent advancements in the genetic engineering of microalgae, *Algal Research*, Volume 53, 2021, 102158, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102158>.

Stirk, W.A., Ördög, V., Van Staden, J., J"ager, K. (2002). Cytokinin- and auxin-like activity in Cyanophyta and microalgae. *Journal of Applied Phycology*, v. 14, p. 215–221, 2002.

Verma, R., Suthar, S., Chand, N., Mutiyar, P. K. (2022). Phycoremediation of milk processing wastewater and lipid-rich biomass production using *Chlorella vulgaris* under continuous batch system, *Science of The Total Environment*, 833, 2022, 155110, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155110>.

Wang, Y., Li, Y.Q., Lv, K., Cheng, J.J., Chen, X.L., Ge, Y., Yu, X.Y. (2018). Soil microalgae modulate grain arsenic accumulation by reducing dimethylarsinic acid and enhancing nutrient uptake in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil* 430, 99–111 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3719-1>.

Zhang, Y., Xiao, Z., Ager, E., Kong, L., Tan, L. (2021). Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods*, Volume 1, Issue 1, 2021, Pages 58-66, ISSN 2772-5669, <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>.