



## Eutrofização como Estratégia na Produção de Energia Renovável e na Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa

### *Eutrophication as a Strategy in Renewable Energy Production and Greenhouse Gas Emission Reduction*

**Ana Paula Sabino Mendes da Rocha**

Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. ORCID-<https://orcid.org/0009-0004-2934-359X>

**Armando José Gomes Filho**

Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. ORCID-<https://orcid.org/0009-0000-1386-1318>

**Carlos Antônio Avelar de Melo**

Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP. ORCID - <https://orcid.org/0009-0008-7947-7595>

**Eliana Cristina Barreto Monteiro**

Escola de Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco-UNICAP, Universidade de Pernambuco- UPE. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0842-779X>

**Galba Maria de Campos-Takaki**

Escola de Tecnologia e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais- CEMACBIOS, MCTI/ Universidade Católica de Pernambuco -UNICAP. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

**Resumo:** A eutrofização artificial é causada pelo enriquecimento excessivo de corpos hídricos por nutrientes, como fósforo e nitrogênio, impulsionado pela ação humana. Está sendo apresentada de forma integrada, relacionando os ciclos biogeoquímicos e os impactos ambientais decorrentes do aporte excessivo de nutrientes, gerando um potencial energético a partir da biomassa produzida. A eutrofização também influencia diretamente a produção e emissão de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), contribuindo para o agravamento da crise climática global. Todavia, investigações científicas contemporâneas demonstram que a biomassa residual de corpos hídricos eutrofizados, sob gestão adequada, constitui um substrato promissor para a conversão bioenergética através da rota da digestão anaeróbica e da produção de biogás. Neste contexto, a compreensão dos impactos ambientais causados pela matéria orgânica e pelos compostos inorgânicos possibilita estratégias biotecnológicas para o aproveitamento na geração de energia renovável e na mitigação da emissão de gases de efeito estufa. Estudos realizados confirmam que o aumento das cargas de nutrientes promove o enriquecimento excessivo no sistema aquático, intensificando a atividade microbiana, levando a mudanças na estrutura trófica e ao aumento da produção de gases de efeito estufa. Entretanto, a biomassa gerada em sistemas eutrofizados apresenta elevado potencial energético, podendo ser utilizada na obtenção de biogás e biometano, contribuindo para a redução do uso de combustíveis fósseis exige o uso da bioeconomia circular e estratégias multidisciplinares capazes de integrar controle ambiental, gestão hídrica e saneamento, em atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), 6 (Água Potável e Saneamento), 7 (Energia Limpa) e 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) através de ações práticas integradas.

**Palavras-chave:** eutrofização; ciclos biogeoquímicos; gases de efeito estufa; biogás; energia renovável; metabolismo aquático.

**Abstract:** Artificial eutrophication, caused by the excessive enrichment of water bodies with nutrients such as phosphorus and nitrogen, driven by human activity, is being presented in an integrated way, relating biogeochemical cycles and the environmental impacts associated with excessive nutrient input, generating energy potential from the biomass produced. Eutrophication also directly influences the production and emission of greenhouse gases, especially carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), contributing to the worsening of the global climate crisis. However, contemporary scientific investigations demonstrate that the residual biomass of eutrophic water bodies, under proper management, constitutes a promising substrate for bioenergy conversion through anaerobic digestion and biogas production. In this context, understanding the environmental impacts caused by organic matter and inorganic compounds enables biotechnological strategies for their use in renewable energy generation and in mitigating greenhouse gas emissions. Studies confirm that increased nutrient loads promote excessive enrichment in aquatic systems, intensifying microbial activity, leading to changes in trophic structure and increased greenhouse gas production. However, the biomass generated in eutrophic systems has high energy potential and can be used to obtain biogas and biomethane, contributing to the reduction of fossil fuel use. This requires the use of a circular bioeconomy and multidisciplinary strategies capable of integrating environmental control, water management, and sanitation, in accordance with the Sustainable Development Goals SDO 3 (Good Health and Well-being), 6 (Clean Water and Sanitation), 7 (Clean Energy), 12 (Responsible Consumption and Production), and 13 (Climate Action) through integrated practical actions.

**Keywords:** eutrophication; biogeochemical cycles; greenhouse gases; biogas; renewable energy; aquatic metabolism

## INTRODUÇÃO

A eutrofização é um processo caracterizado pelo enriquecimento excessivo de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, em ecossistemas aquáticos, promovendo alterações significativas no equilíbrio ecológico desses ambientes. Embora possa ocorrer naturalmente, a intensificação das atividades humanas, como agricultura intensiva, urbanização, despejo de efluentes domésticos e industriais e mudanças no uso do solo, transforma a eutrofização em um dos principais problemas ambientais contemporâneos.

Esse fenômeno desencadeia florações algais, redução do oxigênio dissolvido, perda de biodiversidade e degradação, alterando a qualidade da água em ambientes continentais e costeiros. Os ciclos biogeoquímicos do nitrogênio, fósforo, carbono e enxofre sofrem profundas alterações em ambientes eutrofizados. O excesso de nutrientes rompe o equilíbrio natural desses ciclos, acelerando os processos metabólicos e modificando as comunidades microbianas responsáveis pela dinâmica ecológica dos sistemas aquáticos. O nitrogênio exerce papel central nesses processos, participando de mecanismos como nitrificação, desnitrificação, amonificação e fixação biológica. As alterações climáticas e as ações antrópicas intensificam a carga de nutrientes nos corpos hídricos, afetando diretamente o funcionamento ecológico dos ecossistemas aquáticos e comprometendo a biodiversidade local. A intensificação da produtividade biológica em ambientes

eutrofizados favorece o aumento da matéria orgânica e de macrófitas aquáticas, as quais constituem substratos promissores para a conversão em bioenergia.

A decomposição desse material orgânico consome grandes quantidades de oxigênio dissolvido, estabelecendo condições anaeróbias no comportamento sedimentar e favorecendo rotas metabólicas como a metanogênese e a denitrificação. Como consequência, observa-se o incremento das emissões de gases de efeito estufa, notadamente o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o que converte diversos ecossistemas aquáticos em fontes antropogênicas significativas desses compostos.

As implicações climáticas: a eutrofização compromete severamente a biodiversidade e a integridade funcional dos ecossistemas afetados; a proliferação excessiva de algas, por exemplo, reduz a penetração de luz na coluna d'água, desestrutura as cadeias tróficas e favorece processos de homogeneização biológica. Investigações científicas demonstram uma redução significativa na diversidade funcional de cianobactérias e um decréscimo na riqueza zooplanctônica em ambientes hipereutróficos, notadamente em reservatórios expostos a eventos de seca e elevadas cargas de nutrientes. Além disso, variáveis como sazonalidade, o regime de marés, a estratificação térmica e o tempo de residência da água modulam diretamente a intensidade da eutrofização e os impactos ecológicos.

Os impactos ambientais inerentes à eutrofização são apresentados em estudos recentes, evidenciando que a biomassa excedente gerada nesses ecossistemas pode ser valorizada como uma fonte estratégica de energia renovável. A digestão anaeróbia de algas, macrófitas e sedimentos com elevada densidade de matéria orgânica viabiliza a obtenção de biogás e biometano, contribuindo diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para a descarbonização da matriz energética, ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, o manejo da biomassa proveniente da eutrofização passa a ser compreendido como potencial estratégia de bioeconomia circular, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) concernentes à energia limpa, ao saneamento ambiental e à mitigação das mudanças climáticas.

Diante desse cenário, o presente trabalho analisa a eutrofização sob uma perspectiva integrada, articulando processos ecológicos, ciclos biogeoquímicos, emissões de gases de efeito estufa e potencial de valorização energética da biomassa gerada em ambientes aquáticos eutrofizados. A compreensão desses fenômenos indica um aporte excessivo de nutrientes, alterando o metabolismo aquático, influenciando a dinâmica microbiana e intensificando os fluxos de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . Adicionalmente, discutem-se estratégias de recuperação bioenergética via digestão anaeróbia para a produção de biogás. E ainda, torna-se importante identificar os principais impactos ambientais associados à eutrofização em reservatórios, lagoas e estuários, bem como, avaliar o papel da bioenergia como alternativa complementar para mitigação climática e promoção da sustentabilidade ambiental.

O problema central abordado nesta pesquisa reside na exacerbação dos processos de eutrofização em ecossistemas aquáticos, impulsionada principalmente

pela intensificação das atividades antrópicas, pelo déficit de saneamento básico, pelo descarte inadequado de efluentes domésticos e industriais, além do uso excessivo de fertilizantes agrícolas e da expansão urbana desordenada. Tal cenário acarreta a deterioração da qualidade hídrica, a perda de biodiversidade, a recorrência de florações algais tóxicas e o incremento das emissões de gases de efeito estufa em ambientes continentais e costeiros.

Investigações conduzidas no Brasil corroboram que os corpos hídricos submetidos a elevadas cargas de nitrogênio e fósforo apresentam alterações severas na dinâmica ecológica, comprometendo o abastecimento hídrico, a pesca, o turismo e a integridade dos serviços ecossistêmicos. Adicionalmente, as mudanças climáticas globais tendem a agravar essas patologias, ao promoverem o aumento da temperatura da água, a intensificação do metabolismo microbiano e a expansão das zonas hipóxicas.

Os estudos realizados fundamentam-se na premência de ampliar o conhecimento científico acerca das complexas interações entre eutrofização, metabolismo aquático, mudanças climáticas e produção de energia renovável. Embora, a eutrofização seja classicamente abordada como degradação ambiental. As evidências contemporâneas indicam que a biomassa excedente gerada nos ecossistemas constitui uma relevante alternativa para a obtenção de biogás e biometano. Por conseguinte, torna-se fundamental o desenvolvimento de abordagens biotecnológicas integradas associando remediação ambiental e mitigação de gases de efeito estufa relacionados à transição energética para os seguintes tópicos: (i) mecanismos ecológicos e biogeoquímicos da eutrofização; (ii) dinâmica de nitrogênio e fósforo em ambientes aquáticos; (iii) emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em sistemas eutrofizados; (iv) microbiologia associada à decomposição anaeróbia; (v) impactos ecológicos sobre biodiversidade aquática, e (vi) potencial energético do biogás e biomassa algal.

## METODOLOGIA

A revisão bibliográfica realizada foi de forma integrativa, de natureza qualitativa e de caráter exploratório-descritivo. A abordagem adotada de perspectiva interdisciplinar, dirigida para compreensão das interdependências entre eutrofização, os ciclos biogeoquímicos, a emissão de gases de efeito estufa e a viabilidade de valorização energética. A metodologia integrativa justifica-se pela premissa de sintetizar múltiplas correntes teóricas e metodológicas, o que viabiliza uma análise holística e sistêmica dos processos ecológicos, químicos, microbiológicos e tecnológicos associados ao enriquecimento nutricional de sistemas aquáticos. A revisão bibliográfica integrativa, utilizando artigos científicos nacionais e internacionais, dissertações, documentos técnicos e publicações recentes sobre eutrofização, metabolismo aquático, ciclos do nitrogênio e fósforo, emissão de gases de efeito estufa e aproveitamento energético do biogás. Foram consultadas bases como Scopus, ScienceDirect, Web of Science, Google Scholar, SciELO e Portal de Periódicos CAPES. As buscas foram conduzidas tanto em português quanto

em inglês, utilizando as combinações: eutrophication; greenhouse gases; biogas production; eutrophic reservoir; nitrogen cycle; aquatic ecosystems; anaerobic digestion e aquatic biomass.

## MECANISMOS ECOLÓGICOS E BIOGEOQUÍMICOS DA EUTROFIZAÇÃO

A eutrofização promove profundas alterações metabólicas nos ecossistemas aquáticos, afetando processos ecológicos, composição biológica e fluxos de matéria e energia. O enriquecimento nutricional favorece o crescimento excessivo de fitoplâncton e cianobactérias, aumentando inicialmente a produtividade primária. Entretanto, o excesso de biomassa orgânica intensifica processos de decomposição bacteriana, elevando o consumo de oxigênio dissolvido.

Wang (2024) ressalta que ambientes eutrofizados frequentemente apresentam zonas hipóxicas e anóxicas associadas à decomposição intensa da matéria orgânica. A redução do oxigênio dissolvido compromete organismos aeróbios e altera profundamente a estrutura ecológica aquática. Espécies sensíveis são substituídas por organismos tolerantes à baixa oxigenação, promovendo simplificação trófica e homogeneização ambiental.

Silva, Moura e Amorim (2025) observaram redução significativa da diversidade funcional em ambientes hipereutróficos, indicando perda de funções ecológicas importantes.

Os resultados também demonstram forte relação entre eutrofização e intensificação da atividade microbiana. Dashora *et al.* (2025) identificaram predominância de grupos bacterianos funcionalmente vinculados à fermentação, à redução de nitrato e à redução de sulfato em lagos hipertrofizados. Os autores corroboram o enriquecimento nutricional alterando a estrutura das comunidades microbianas, favorecendo vias metabólicas anaeróbias tanto para a ciclagem de nutrientes quanto para o potencial de geração de biogás nesses ambientes.

Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta os tipos de processos ambientais relacionados aos impactos ecológicos e as consequências ambientais causadas pela eutrofização, segundo as abordagens descritas no conjunto de fontes de pesquisa utilizadas,

**Tabela 1 – Principais impactos ecológicos da eutrofização.**

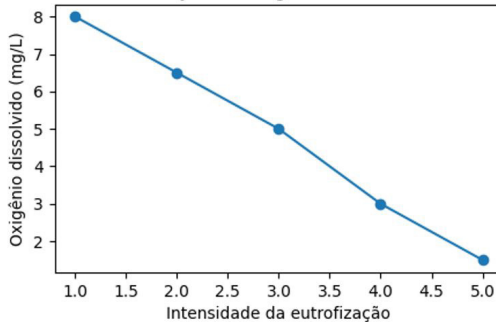
PROCESSO AMBIENTAL	PRINCIPAIS EFEITOS ECOLÓGICOS	CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS
Enriquecimento por nutrientes	Crescimento excessivo de algas	Florações algais
Aumento da matéria orgânica	Decomposição bacteriana intensa	Hipóxia
Atividade microbiana anaeróbia	Metanogênese	Emissão de CH <sub>4</sub>
Alterações ecológicas	Homogeneização ambiental	Perda de biodiversidade

**Fonte: adaptado de Wang (2024), Dashora *et al.* (2025) e Silva, Moura e Amorim (2025).**

E ainda, os microrganismos desempenham papel central na decomposição da matéria orgânica e na gênese de gases como  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ . Consequentemente, ambientes aquáticos eutrofizados configuram-se como fontes expressivas de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que o acúmulo de detritos orgânicos no sedimento estabelece condições de anoxia favoráveis à metanogênese. Marinho, Fonseca e Esteves (2016) demonstraram que lagoas costeiras submetidas à eutrofização artificial apresentam aumento significativo das emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  para a atmosfera. O metano sintetizado em sedimentos anóxicos é transferido para a interface água-atmosfera por meio de processos de difusão, ebulição ou transporte mediado por macrófitas aquáticas, as quais atuam como condutores desses gases.

Nesse panorama, Carlos (2016) verificou que sistemas lênticos rasos e eutrofizados exibem taxas elevadas de emissão de metano, impulsionadas pela abundância de macrófitas aquáticas e pelo incremento da carga de matéria orgânica sedimentar. De forma complementar ao  $\text{CH}_4$ , o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) assume uma relevância climática crítica; este gás possui um Potencial de Aquecimento Global (GWP) aproximadamente 298 vezes superior ao do  $\text{CO}_2$  em um horizonte temporal de 100 anos. A coexistência desses gases em ambientes degradados reforça a necessidade de estratégias que mitiguem a liberação descontrolada para a troposfera, como apresentado na Figura 1.

**Figura 1 – Relação entre eutrofização e oxigênio dissolvido.**  
Redução do oxigênio dissolvido



Fonte: autoria própria.

## Dinâmica de Nitrogênio e Fósforo em Ambientes Aquáticos

A gênese do  $\text{N}_2\text{O}$  está intrinsecamente associada aos processos de nitrificação e, sobretudo, à denitrificação incompleta em sistemas com elevada carga nitrogenada. As mudanças climáticas e o aumento da temperatura global atuam como catalisadores desses mecanismos, considerando que o estresse térmico favorece o metabolismo microbiano, a proliferação algal e a consequente depleção de oxigênio. Nesse cenário, Mattoo *et al.* (2025) destacaram que as alterações climáticas modulam diretamente as rotas metabólicas do ciclo do nitrogênio, potencializando a magnitude das emissões gasosas e agravando o impacto ambiental de ecossistemas já vulnerabilizados pela eutrofização

A eutrofização impacta severamente a biodiversidade aquática, visto que ambientes hipereutróficos tendem a apresentar uma redução na riqueza de espécies e a simplificação das teias tróficas. Em reservatórios tropicais, Silva, Moura e Amorim (2025) observaram um decréscimo na diversidade funcional de cianobactérias em sistemas eutróficos e hipereutróficos, o que denota a perda de funções ecológicas singulares. Paralelamente, Silva *et al.* (2020) identificaram baixa riqueza zooplanctônica em reservatórios do semiárido brasileiro sob condições de seca e eutrofização severa. Essa homogeneização biótica compromete a resiliência dos ecossistemas, tornando-os mais suscetíveis a perturbações ambientais e climáticas.

Nesse contexto, a modelagem computacional configura-se como uma ferramenta estratégica para a compreensão e a predição de eventos eutróficos. Veiga (2001) enfatiza a aplicação de modelos matemáticos de balanço de nutrientes na avaliação do potencial trófico de reservatórios. Esses modelos permitem a simulação de cenários futuros, a identificação de fontes de poluição e o subsídio a políticas públicas de gestão hídrica. Assim, a modelagem auxilia na previsão de florações algais, na delimitação de zonas hipóxicas e na estimativa das emissões de gases de efeito estufa. Portanto, em virtude dos impactos ambientais intrínsecos à eutrofização, a biomassa gerada nesses ecossistemas detém um elevado potencial energético. A digestão anaeróbia possibilita a conversão da matéria orgânica em biogás, composto majoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Nesse sentido, Paolini *et al.* (2018) ressaltam que o biogás se consolida como uma alternativa energética sustentável, apta a mitigar as emissões derivadas de combustíveis fósseis. Sob a ótica da bioeconomia circular, o aproveitamento de algas, macrófitas aquáticas e lodos sedimentares transmudam esses materiais de passivos ambientais em recursos valiosos para a geração de biometano, energia elétrica e térmica. A digestão anaeróbia de biomassa algal destaca-se pela elevada biodegradabilidade dos compostos orgânicos. Embora as florações intensas acarretem transtornos operacionais e ecológicos, o processamento dessa biomassa em biodigestores permite a recuperação de energia renovável, enquanto mitiga o acúmulo de nutrientes no corpo hídrico. Paralelamente, as macrófitas aquáticas, como a *Eichhornia crassipes* (aguapé), apresentam taxas de crescimento aceleradas em resposta ao excesso de nutrientes. Segundo Carlos (2016), as plantas exercem influência determinante nos fluxos de gases de efeito estufa em sistemas rasos. Assim, o manejo e a colheita seletiva dessas macrófitas para fins energéticos emergem como uma estratégia de dupla finalidade: a biorremediação do ecossistema e a expansão da matriz de energia renovável.

## Emissões de $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ e $\text{N}_2\text{O}$ em sistemas eutrofizados

Outro componente importante para aproveitamento energético corresponde aos lodos sedimentares acumulados em reservatórios eutrofizados. O excesso de matéria orgânica oriunda da decomposição de algas, macrófitas e resíduos orgânicos promove acúmulo de sedimentos ricos em carbono e nutrientes. Em condições anaeróbias, esses sedimentos tornam-se ambientes altamente ativos do ponto

de vista microbiológico, favorecendo processos de fermentação e metanogênese. Veiga (2001) ressalta que reservatórios eutrofizados apresentam intensificação de processos biológicos e acúmulo significativo de nutrientes e matéria orgânica sedimentar. A remoção periódica desses lodos e sua utilização em biodigestores podem representar alternativa sustentável para recuperação da capacidade hídrica dos reservatórios e geração de biogás.

A produção de biometano constitui uma etapa avançada do aproveitamento energético do biogás. Após a digestão anaeróbia, o biogás gerado passa por processos de purificação para remoção de dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, vapor d'água e outras impurezas, elevando a concentração de metano. O biometano obtido apresenta características semelhantes às do gás natural fóssil, podendo ser utilizado como combustível veicular, para geração de eletricidade, para aquecimento industrial e para abastecimento de redes de gás. Paolini *et al.* (2018) destacaram que o aprimoramento do biogás para produção de biometano amplia significativamente os benefícios ambientais da digestão anaeróbia, embora se torne necessário o controle das emissões fugitivas de metano durante o processo (Tabela 2).

A geração de energia elétrica e térmica a partir da biomassa eutrofizada ocorre principalmente por meio da combustão controlada do biogás em motores, turbinas ou sistemas de cogeração. A cogeração permite produção simultânea de eletricidade e calor, aumentando a eficiência energética do sistema. O calor produzido pode ser utilizado em processos industriais, secagem de biomassa ou manutenção térmica dos próprios biodigestores. A energia elétrica pode abastecer estações de tratamento, propriedades rurais, comunidades isoladas ou ser inserida nas redes públicas de distribuição energética. Além dos benefícios energéticos, o aproveitamento da biomassa eutrofizada contribui diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A captura e utilização do metano evitam a liberação direta para a atmosfera, reduzindo o impacto climático associado à decomposição anaeróbia natural da matéria orgânica em reservatórios eutrofizados. Segundo Lins *et al.* (2022), sistemas anaeróbios associados ao aproveitamento do biogás apresentam forte contribuição para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, em especial, aqueles relacionados à energia limpa, saneamento ambiental e ação climática.

**Tabela 2 – Gases de efeito estufa associados à eutrofização.**

<b>GASES DE EFEITO ESTUFA</b>	<b>PROCESSO DE FORMAÇÃO</b>	<b>POTENCIAL CLIMÁTICO</b>
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Respiração e decomposição	Referência padrão
Metano (CH <sub>4</sub> )	Metanogênese anaeróbia	28x superior ao CO <sub>2</sub>
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	Nitrificação/desnitrificação	298x superior ao CO <sub>2</sub>

**Fonte: Adaptado de Carlos (2016), Paolini *et al.* (2018), Mattoo (n.d.).**

## **Microbiologia Associada à Decomposição Anaeróbia**

Do ponto de vista ambiental, o uso energético da biomassa eutrofizada também favorece a remoção de nutrientes dos corpos hídricos, contribuindo para

o controle parcial da eutrofização. A retirada de algas, macrófitas e sedimentos reduz a disponibilidade interna de nitrogênio e fósforo, auxiliando na recuperação da qualidade da água e na redução da ocorrência de florações algais.

Entretanto, apesar do elevado potencial energético, alguns desafios ainda limitam a aplicação em larga escala dessas tecnologias. Entre os principais obstáculos destacam-se a variabilidade sazonal da biomassa, custos operacionais de coleta e transporte, presença de toxinas algais, necessidade de pré-tratamentos físicos ou químicos e controle das emissões secundárias associadas ao digestato e ao biogás. Além disso, a eficiência energética depende diretamente das características químicas da biomassa utilizada, especialmente da relação carbono/nitrogênio e do teor de umidade.

Assim, o aproveitamento energético da biomassa eutrofizada deve ser compreendido como uma estratégia complementar dentro de programas integrados de gestão ambiental. A combinação entre saneamento básico, controle de nutrientes, recuperação ecológica e produção de bioenergia pode transformar parcialmente os impactos da eutrofização em oportunidades sustentáveis voltadas à segurança energética, mitigação climática e conservação dos recursos hídricos.

A biomassa algal, caracterizada por sua elevada produtividade e cinemática de crescimento acelerado, consolida-se como uma matéria-prima promissora para a bioenergia. Para além da valoração energética, o aproveitamento sistemático da biomassa mitiga o acúmulo de detritos orgânicos e auxilia no controle da eutrofização. Nesse contexto, Lins *et al.* (2022) enfatizam que sistemas anaeróbios integrados à recuperação de biogás contribuem para a redução de resíduos, a geração de energia limpa e a mitigação das mudanças climáticas.

Esta integração entre saneamento, recuperação ambiental e bioenergia converge com os preceitos da economia circular. Sob este paradigma, os resíduos orgânicos transcendem a condição de passivos ambientais para se tornarem insumos energéticos e agrônômicos. O resíduo, subproduto da digestão anaeróbia, pode ser aplicado como biofertilizante, promovendo a reciclagem de nutrientes e reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos de alta pegada de carbono. Contudo, conforme alertam Paolini *et al.* (2018), embora o resíduo possua um potencial agrônômico relevante, o manejo exige protocolos rigorosos para prevenir emissões secundárias de compostos nitrogenados e amônia (NH<sub>3</sub>). Por fim, a valorização dessa biomassa eutrofizada pode otimizar a viabilidade econômica do manejo ambiental em reservatórios e estações de tratamento (Tabela 3).

**Tabela 3 – Potencial energético da biomassa eutrofizada.**

BIOMASSA	APLICAÇÃO ENERGÉTICA	PRODUTO GERADO
Algas	Digestão anaeróbia	Biogás
Macrófitas aquáticas	Biodigestores	Metano
Lodo sedimentar	Digestão anaeróbia	Biometano
Digestato	Uso agrícola	Reciclagem de nutrientes

**Fonte: Adaptado de Lins *et al.* (2022) e Paolini *et al.* (2018).**

Ademais, a implementação de políticas públicas que integrem saneamento, agricultura sustentável e recuperação hídrica é imperativa para a mitigação sistêmica da eutrofização. Contudo, não obstante o elevado potencial energético da biomassa gerada nesses sistemas, a viabilização de tecnologias em larga escala é cerceada por desafios técnicos, operacionais e econômicos. A eficiência na conversão de algas, macrófitas e lodos sedimentares em bioenergia é condicionada por variáveis que impactam diretamente a estabilidade da digestão anaeróbia e a rentabilidade dos projetos. Dentre os principais problemas, destacam-se a heterogeneidade na composição da biomassa, as complexidades logísticas de coleta e transporte, os elevados custos operacionais e a exigência de métodos de pré-tratamento. Somam-se a esses fatores os riscos biológicos atinentes às toxinas algais e a necessidade de controle rigoroso sobre as emissões fugitivas de metano, sob pena de comprometer o balanço de carbono da tecnologia;

A acentuada heterogeneidade na composição da biomassa constitui um dos principais entraves à padronização dos processos de valoração energética. Em ecossistemas eutrofizados, o perfil químico da biomassa é modulado por fatores sinérgicos, tais como a sazonalidade, oscilações térmicas, aporte de nutrientes, batimetria e a dinâmica sucessional das comunidades biológicas. Biomassas de algas, em particular, exibem variações estequiométricas significativas nos teores de carbono, nitrogênio e fósforo, além de flutuações nas frações de lipídios e carboidratos, o que impacta diretamente a cinética da digestão anaeróbia e o rendimento específico de metano. Nesse âmbito, Dashora *et al.* (2025) evidenciaram que forçantes ambientais e antrópicas alteram a estrutura microbiana e funcional de sistemas hipertróficos, interferindo nas rotas biogeoquímicas de mineralização da matéria orgânica. A variabilidade impõe desafios à previsibilidade do potencial energético e exige protocolos rigorosos de monitoramento do afluente para garantir a estabilidade operacional dos biodigestores.

## Impactos Ecológicos sobre Biodiversidade Aquática

As dificuldades logísticas de coleta também representam um importante obstáculo operacional. Em muitos reservatórios, lagos e estuários eutrofizados, a biomassa encontra-se dispersa em grandes áreas, dificultando a remoção e o transporte. Florações algais superficiais podem apresentar rápida dispersão devido à ação dos ventos, correntes e variações hidrológicas. No caso das macrófitas aquáticas, o grande volume e elevado teor de umidade aumentam os custos de manejo e transporte. Além disso, reservatórios localizados em regiões de difícil acesso demandam utilização de equipamentos específicos para remoção da biomassa. Em sistemas lênticos submetidos à intensa eutrofização, o acúmulo excessivo de matéria orgânica sedimentar também dificulta operações de dragagem e remoção de lodos.

Os custos operacionais associados ao aproveitamento energético da biomassa eutrofizada incluem despesas com coleta, transporte, armazenamento, pré-tratamento, operação de biodigestores e purificação do biogás. A elevada umidade presente em algas e macrófitas reduz a densidade energética da biomassa

e aumenta os custos relacionados à secagem ou estabilização do material. Em muitos casos, os custos operacionais tornam-se economicamente limitantes, principalmente em projetos de pequena escala ou em regiões sem infraestrutura adequada. Além disso, sistemas de biodigestão anaeróbia exigem controle rigoroso de parâmetros operacionais, como temperatura, pH, carga orgânica e relação carbono/nitrogênio, aumentando a complexidade técnica dos processos.

Outro desafio importante refere-se à necessidade de tecnologias de pré-tratamento da biomassa. Muitas espécies de algas e macrófitas apresentam paredes celulares resistentes à degradação microbiana, dificultando a biodisponibilidade da matéria orgânica durante a digestão anaeróbia. Dessa forma, tornam-se necessários pré-tratamentos físicos, químicos, térmicos ou biológicos para aumentar a eficiência da produção de biogás. Entre as técnicas mais utilizadas destacam-se trituração mecânica, hidrólise térmica, ultrassom, tratamento alcalino e pré-fermentação biológica. Contudo, essas tecnologias aumentam os custos energéticos e operacionais dos sistemas. Paolini *et al.* (2018) ressaltam que o desempenho ambiental e energético da digestão anaeróbia depende diretamente do manejo adequado da biomassa e da eficiência das etapas de processamento.

Os riscos de contaminação por toxinas algais representam uma preocupação ambiental e sanitária significativa. Ambientes eutrofizados frequentemente apresentam florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, capazes de produzir substâncias como microcistinas, anatoxinas e saxitoxinas. Essas toxinas podem permanecer presentes na biomassa utilizada para digestão anaeróbia e no digestato resultante do processo. Wang (2024) destaca que florações algais associadas à eutrofização representam importantes riscos ecológicos e sanitários devido à proliferação de organismos tóxicos em ecossistemas aquáticos. A presença dessas substâncias exige monitoramento rigoroso da biomassa e adoção de medidas de segurança para evitar contaminação ambiental e riscos à saúde humana.

## Potencial Energético do Biogás e Biomassa Algal

Outro aspecto crítico envolve o controle das emissões fugitivas de metano. Embora o biogás represente importante alternativa energética renovável, falhas operacionais em biodigestores, sistemas de armazenamento ou redes de distribuição podem provocar vazamentos de metano para a atmosfera. O CH<sub>4</sub> possui potencial de aquecimento global aproximadamente 28 vezes superior ao dióxido de carbono no horizonte de 100 anos, tornando essencial o controle dessas emissões. Paolini *et al.* (2018) alertam que perdas de metano durante processos de produção e purificação do biogás podem reduzir significativamente os benefícios ambientais associados à digestão anaeróbia. Dessa forma, sistemas de vedação eficientes, monitoramento contínuo e tecnologias adequadas de captura tornam-se fundamentais para garantir a sustentabilidade ambiental da produção energética (Figura 2).

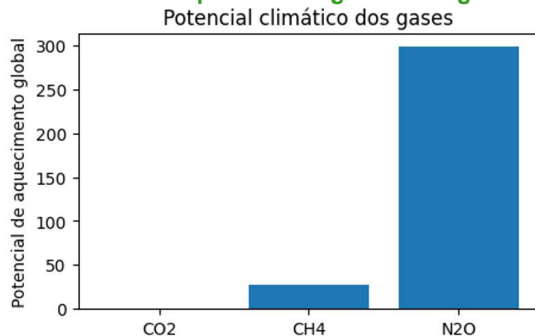
Para além das limitações técnicas e operacionais, variáveis climáticas e hidrológicas exercem influência direta sobre a viabilidade do aproveitamento energético. Eventos extremos, tais como estiagens prolongadas e a alteração dos regimes lóticos e lênticos, modulam a dinâmica da eutrofização, afetando a

disponibilidade e a complexidade química da biomassa. Nesse contexto, Mattoo *et al.* (2025) reiteram que as mudanças climáticas, em sinergia com as pressões antrópicas, alteram substancialmente os processos metabólicos do ciclo do nitrogênio e a arquitetura microbiana dos ecossistemas.

Contudo, a despeito de tais complexidades, a valoração energética da biomassa eutrofizada permanece como uma alternativa estratégica para a convergência entre remediação ambiental e segurança energética. O progresso em sistemas de biodigestão de alta eficiência e o fortalecimento de políticas de bioeconomia circular tendem a ampliar a exequibilidade econômica dessas tecnologias nas próximas décadas. É imperativo ressaltar, todavia, que o aproveitamento energético atua como uma medida mitigadora e não substitui ações preventivas de controle da carga de nutrientes, as quais permanecem como o pilar fundamental para a restauração da integridade ecológica dos corpos hídricos.

Nesse prisma, a implementação de medidas estruturantes — como a universalização do saneamento básico, o controle rigoroso da lixiviação de fertilizantes, a restauração de matas ciliares e a educação ambiental — é fundamental para a governança dos recursos hídricos. Quevedo e Paganini (2018) enfatizam a urgência de políticas públicas voltadas ao controle das fontes de fósforo, notadamente aquelas associadas a detergentes e efluentes domésticos. No horizonte futuro, a convergência entre tecnologias limpas, modelagem preditiva e bioeconomia circular poderá transmutar os impactos da eutrofização em oportunidades de desenvolvimento sustentável.

Em síntese, as evidências analisadas reiteram que a eutrofização desencadeia profundas alterações metabólicas nos ecossistemas, subvertendo processos ecológicos e fluxos de matéria e energia. Embora o enriquecimento nutricional incremente a produtividade primária inicial, o excedente de biomassa exacerba a decomposição bacteriana, levando à severa depleção de oxigênio dissolvido. Conforme ressaltado por Wang (2024), ambientes eutrofizados são frequentemente marcados por zonas hipóxicas e anóxicas, decorrentes desse metabolismo heterotrófico intenso. As condições culminam na redução da diversidade funcional, como observado por Silva, Moura e Amorim (2025), sinalizando a erosão de serviços ecossistêmicos vitais e a fragilização da resiliência aquática. Observa-se redução progressiva do oxigênio dissolvido à medida que aumenta a intensidade da eutrofização, favorecendo condições hipóxicas e anóxicas. Os estudos evidenciam que a biomassa produzida em ambientes eutrofizados pode ser utilizada como fonte de energia renovável, especialmente por meio da digestão anaeróbia. O aproveitamento energético de algas, macrófitas e sedimentos ricos em matéria orgânica representa importante estratégia de bioeconomia circular. Apesar do CO<sub>2</sub> ocorrer em maiores volumes absolutos, o N<sub>2</sub>O apresenta potencial de aquecimento global muito superior.

**Figura 2 – Potencial de aquecimento global dos gases emitidos.**

Fonte: Adaptado de Lins *et al.* (2022) e Paolini *et al.* (2018).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eutrofização representa um dos principais desafios ambientais contemporâneos relacionados à degradação dos ecossistemas aquáticos, considerando que o enriquecimento excessivo de nitrogênio e fósforo altera os ciclos biogeoquímicos, com promoção de florações algais, redução dos níveis de oxigênio dissolvido, comprometendo a biodiversidade aquática.

A eutrofização intensifica processos metabólicos anaeróbios e favorece a emissão de gases de efeito estufa, como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Dessa forma, ambientes aquáticos eutrofizados deixam de atuar apenas como reservatórios de carbono e passam a contribuir para o agravamento das mudanças climáticas globais.

Os impactos ecológicos da eutrofização afetam diretamente a qualidade da água, o abastecimento humano, a pesca, o turismo e a saúde pública e exigem políticas integradas de gestão hídrica e saneamento ambiental.

A biomassa produzida em sistemas eutrofizados apresenta elevado potencial energético.

A digestão anaeróbia de algas, macrófitas e sedimentos ricos em matéria orgânica pode gerar biogás e biometano, contribuindo para a produção de energia renovável e a redução da dependência de combustíveis fósseis.

O aproveitamento energético da biomassa eutrofizada corrobora os princípios da economia circular, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável relacionados à energia limpa, saneamento, consumo responsável e ação climática.

O uso energético da biomassa não elimina a necessidade de controle preventivo da eutrofização. Medidas estruturais de saneamento básico, controle de efluentes, gestão agrícola sustentável, recuperação de áreas degradadas e educação ambiental são essenciais.

A compreensão integrada da eutrofização com os ciclos biogeoquímicos, emissões de gases de efeito estufa e produção de bioenergia constitui uma

abordagem estratégica para as soluções sustentáveis da conservação hídrica, mitigação climática e transição energética.

## REFERÊNCIAS

AMMENBERG, J.; *et al.* **Identification and assessment of the sustainability effects of biogas solutions.** IEA Bioenergy Task 37 Report, 2025.

CARLOS, A. R. **Efeitos da eutrofização e da composição de espécies de macrófitas sobre a emissão de gases de efeito estufa em lagos rasos.** 2016. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2016.

DASHORA, M.; KUMAR, M.; KAUSHIK, G.; KUMAR, A. **Exploring biogeochemical transformation in a hypertrophic lake with dual focus on environmental cues and potential functional fingerprints of littoral bacteria.** Scientific Reports, v. 15, 2025.

FAROBIE, O.; *et al.* Sustainable biogas production through anaerobic co-digestion of *Ulva lactuca* and cow manure for enhanced methane yield. **Sustainable Energy & Fuels**, 2025.

GUAN, H.; NIU, Y.; ZU, C.; KANG, J. Theoretical modeling and quantitative research on aquatic ecosystems driven by multiple factors. **arXiv Preprint**, 2025.

HE, S.; GUO, X.; ZHAO, M.; CHEN, D.; FU, S.; TIAN, G.; XU, H.; LIANG, X.; WANG, H.; LI, G.; LIU, X. Ecological restoration reduces greenhouse gas emissions by altering planktonic and sedimentary microbial communities in a shallow eutrophic lake. **Environmental Research**, 2025.

LINS, L. P.; FURTADO, A. C.; MITO, J. Y. L.; PADILHA, J. C. O aproveitamento energético do biogás como ferramenta para os objetivos do desenvolvimento sustentável. **Interações**, v. 23, n. 4, 2022.

MA, J.; WANG, Z.; ZHOU, C.; GAO, Y.; XU, X.; ZHANG, Z.; YU, M.; HE, F.; JIA, R.; LUO, Q.; XU, Q.; XU, X.; KINOUCI, T.; LIU, J. Response of greenhouse gas emissions to synergistic effects of terrigenous organic matter input and salinity dynamics in estuary. **Carbon Research**, v. 4, n. 65, 2025.

MARINHO, C. C.; FONSECA, A. L. S.; ESTEVES, F. A. Impactos antrópicos nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro: uma revisão sobre a eutrofização artificial e gases de efeito estufa. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, Brasília, v. 13, n. 32, p. 703-728, 2016.

MATTOO, R.; MALLIKARJUNA, S. B.; HEMACHAR, N. **Ecosystem and Climate Change Impacts on the Nitrogen Cycle and Biodiversity.** Nitrogen, v. 6, n. 78, 2025.

PAOLINI, V.; PETRACCHINI, F.; SEGRETO, M.; TOMASSETTI, L.; NAJA, N.; CECINATO, A. Impacto ambiental do biogás: uma breve revisão do conhecimento

atual. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A, v. 53, n. 10, p. 899-906, 2018.

QUEVEDO, C. M. G.; PAGANINI, W. S. A disponibilização de fósforo nas águas pelo uso de detergentes em pó: aspectos ambientais e de saúde pública. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 23, n. 11, p. 3891-3902, 2018.

SANTOS, E. O.; MEDEIROS, P. R. P. A ação antrópica e o processo de eutrofização no Rio Paraíba do Meio. **Sociedade & Natureza**, v. 35, 2023.

SANTOS, R. M.; SOUSA, P. H. C.; VARELA, A. W. P.; PAMPLONA, F. C.; SANTOS, M. L. S. Variação espaço-temporal de nutrientes inorgânicos dissolvidos e clorofila a em um estuário amazônico tropical no norte do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, 2023.

SHVIDENKO, A.; *et al.* A System Reanalysis of the Current Greenhouse Gases Budget of Terrestrial Ecosystems. **Global Biogeochemical Cycles**, 2025.

SILVA, C. O. *et al.* Baixa riqueza zooplancônica indicando condições adversas de seca e eutrofização em um reservatório no Nordeste do Brasil. **Iheringia, Série Zoologia**, Porto Alegre, v. 110, 2020.

SILVA, F. S.; MOURA, A. N.; AMORIM, C. A. **Eutrophication drives functional and beta diversity loss in epiphytic cyanobacteria**. *Hydrobiologia*, v. 852, p. 4459-4474, 2025.

VEIGA, B. V. **Modelagem computacional do processo de eutrofização e aplicação de um modelo de balanço de nutrientes a reservatórios da região metropolitana de Curitiba**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

WANG, W. F. Eutrophication mechanisms and their impacts on coastal marine ecosystems. **International Journal of Marine Science**, v. 14, n. 4, p. 285-294, 2024.

ZINKE, J.; *et al.* Greenhouse Gas Dynamics in Coastal Ecosystems. **EGU General Assembly Proceedings**, 2025.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a bolsa da CAPES concedida à Ana Paula Sabino Mendes da Rocha (Processo Nº 88887.156531/2025-00), a Armando José Gomes Filho (Processo Nº 88887.156535/2025-00) e a Carlos Antônio Avelar de Melo (Processo Nº 88887.156533/2025-00) e ao CNPq a Bolsa de Produtividade em Pesquisa concedida à Galba Maria de Campos Takaki (Processo Nº 312241/2022-4).