

Revisão de Sistemas para cultivo de microalgas: uma alternativa sustentável para tratar efluentes e reduzir a poluição atmosférica

Review of systems for cultivation of microalgae: a sustainable alternative to treat effluents and reduce air pollution

Daniela Ercole Dale Luche¹; Bruna Caroline Marques Gonçalves¹; Messias Borges Silva^{1,2}

¹Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho FEG - UNESP Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, SP

²Universidade de São Paulo - EEL - USP Campus de Lorena, Lorena, SP

Resumo

As microalgas são organismos microscópicos procariotos/eucariotos encontrados em ambientes marinhos e em água-doce. Realizam fotossíntese, processo onde ocorre captação de luz para conversão em energia química pelas células. Podem ser cultivadas em sistemas fotoautotrófico, fotoheterotrófico, mixotrófico e heterotrófico. No sistema fotoautotrófico as microalgas utilizam CO₂ como fonte de carbono por meio da fotossíntese, enquanto no fotoheterotrófico utilizam carbono orgânico. O sistema mixotrófico é composto por duas fases: a primeira em sistema fotoautotrófico e a segunda em sistema heterotrófico. O cultivo pode ser praticado em sistemas fechados (fotobiorreatores de placa, tubular e em colunas) ou abertos (*raceways*, lagoas circulares e lagos extensivos). A escolha do regime adequado para essa finalidade depende das características biológicas da microalga e do produto metabólico de interesse. As microalgas podem ser utilizadas para o tratamento de efluentes, além de produzirem matéria-prima para a produção de biocombustíveis de terceira geração. Durante o tratamento de efluentes as microalgas são capazes de remover matéria orgânica acumulada na água residual. Quando descartados em área ambiental, esses compostos ocasionam a eutrofização do solo. A produção de biocombustíveis a partir de microalgas tem sido estudada como alternativa ao uso de combustíveis fósseis, cuja queima gera o acúmulo de gases poluentes contribuintes para o efeito estufa, promovendo a retenção do calor das radiações solares. Neste sentido, além de dar um destino apropriado às águas residuais, o cultivo de microalgas tem sido considerado eficaz quando se objetiva obter energia limpa e sustentável.

Palavras-chave: microalgas, *raceway*, fotobiorreator.

Abstract

Microalgae are microscopic prokaryote/eukaryotic organisms found in marine and freshwater environments. They perform photosynthesis, a process of capturing sunlight for conversion into chemical energy. These microorganisms can be cultivated in photoautotrophic, photoheterotrophic, mixotrophic and heterotrophic systems. In the photoautotrophic system, microalgae use CO₂ as carbon source through photosynthesis, while in photoheterotrophic carbon source is used. Mixotrophic system is composed of two phases: the first in a photoautotrophic system and the second in a heterotrophic system. The cultivation can be practiced in closed systems (plate, tubular, and column photobioreactors) or open ones (*raceways*, circular ponds, and extensive lakes). The choice of an appropriate regime for this purpose depends on the biological characteristics of microalga and product obtained at end of the process. Microalgae can be used for effluent treatment and as raw material for the production of third generation biofuels. During effluents treatment, microalgae are able to remove organic matter accumulated in residual water. When discarded in the environmental area, these compounds cause soil eutrophication. Production of biofuels from microalgae has been study as alternative to use of fossil fuels, whose burning generates greenhouse gases that contribute to the greenhouse effect, promoting retention of heat from solar radiation. In this sense, addition to giving an appropriate destination to wastewater, the microalgae cultivation is considered effective when aiming to obtain cleaner and more sustainable energy.

Keywords: microalgae, *raceway*, photobioreactor.

INTRODUÇÃO

As microalgas são microrganismos procariotos ou eucariotos encontrados em ambientes marinhos e de água-doce. Possuem a capacidade de converter dióxido de carbono (CO₂) em energia química por meio do processo de fotossíntese, produzindo proteínas, carboidratos, hidrogênio, lipídeos e pigmentos (Tan et al., 2015; Brennan & Owende, 2010; Nascimento, 2016). Ao serem cultivadas em presença de fonte de carbono orgânica (regime heterotrófico), a produção de microalgas atinge maior porcentagem de crescimento quando comparadas àquelas cultivadas em meio autotrófico, no qual a única fonte de carbono disponível é a luz (Andrade & Costa, 2008).

As microalgas podem ser cultivadas em sistemas abertos, como tanques aerados de alta taxa e de extremidades com curvas cilíndricas (*raceway ponds*, lagos, etc), e os sistemas fechados (tubular, reator em placa, cônico, piramidal, fermentador, etc.) (Dasgupta et al., 2010). Por serem capazes de metabolizar matéria orgânica e inorgânica presentes no meio, o cultivo de microalgas é considerado viável no tratamento de efluentes, reduzindo o acúmulo de poluentes, como carbono, metais pesados, nitrogênio e fósforo que causam a eutrofização do solo quando descartados em

rios e lagos (Becker, 2004, De La Noue & De Pauw, 1988).

Devido a sua composição rica em lipídeos e carboidratos, a biomassa das microalgas pode ser convertida em diferentes tipos de biocombustíveis como biodiesel, bioetanol, metano, hidrogênio e bio-óleo, biocombustíveis de terceira geração que podem ser uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis, reduzindo assim, a emissão de gases no efeito estufa (Gonçalves et al., 2015; Zorn et al., 2017).

Portanto, o objetivo deste estudo foi realizar uma breve revisão sobre cada tipo de sistema de cultivo microalgal, avaliando suas vantagens e desvantagens, tendo em vista a produção de biomassa no tratamento de efluentes e posterior conversão em biocombustíveis.

Regimes de cultivo utilizados para a produção de biomassa microalgal

As microalgas podem ser cultivadas em quatro diferentes regimes: (i) fotoautotrófico, (ii) fotoheterotrófico (iii) mixotrófico e (iv) heterotrófico. Na Tabela 1, nota-se alguns autores que utilizaram microalgas em seus estudos, além do tipo de regime utilizado durante o cultivo.

Tabela 1. Cultivo de diferentes espécies de microalgas e seus referentes regimes de cultivo.

Table 1. Cultivation of diferentes species of microalgae and their relatives cultivations regimes.

Espécie de microalga	Regime de cultivo	Sistema de cultivo	Tipo de sistema de cultivo	Referência
<i>Chlorella minutissima</i>	Fotoautotrófico	Fechado	Coluna de bolhas	Loures, 2016
<i>Nannochloropsis oculata</i>	Fotoautotrófico	Fechado	Fotobiorreator	Pereira, 2017
<i>Choricystis minor var minor</i>	Fotoautotrófico	Aberto	Tanques	Lima, 2017
<i>Spirogyra</i> sp.	Fotoautotrófico	Aberto	Fotobiorreator	Carrijo et al., 2017
<i>Scenedesmus</i> sp. <i>Aphanocapsa</i> sp. <i>Oocystis</i> sp.	Mixotrófico	Aberto Fechado	<i>In vitro</i> Fotobiorreator de placas planas	Erazo, 2017
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Fotoheterotrófico	Aberto	<i>Raceway</i>	Kramer, 2017
<i>Chlorella minutissima</i>	Fotoautotrófico	Fechado	Fotobiorreator de colunas	Zorn et al., 2017
<i>Chlorella homosphaera</i>	Fotoheterotrófico	Fechado	Fotobiorreator	Ferreira e Costa, 2017
<i>Chlorella</i> sp.	Mixotrófico	Aberto Fechado	Fotobiorreator	Amaral, 2017
<i>Chlorella vulgaris</i>	Mixotrófico	Fechado	Fotobiorreator	Bastos, 2017

As características de cada tipo de cultivo podem ser observadas, de forma resumida, na Figura 1.

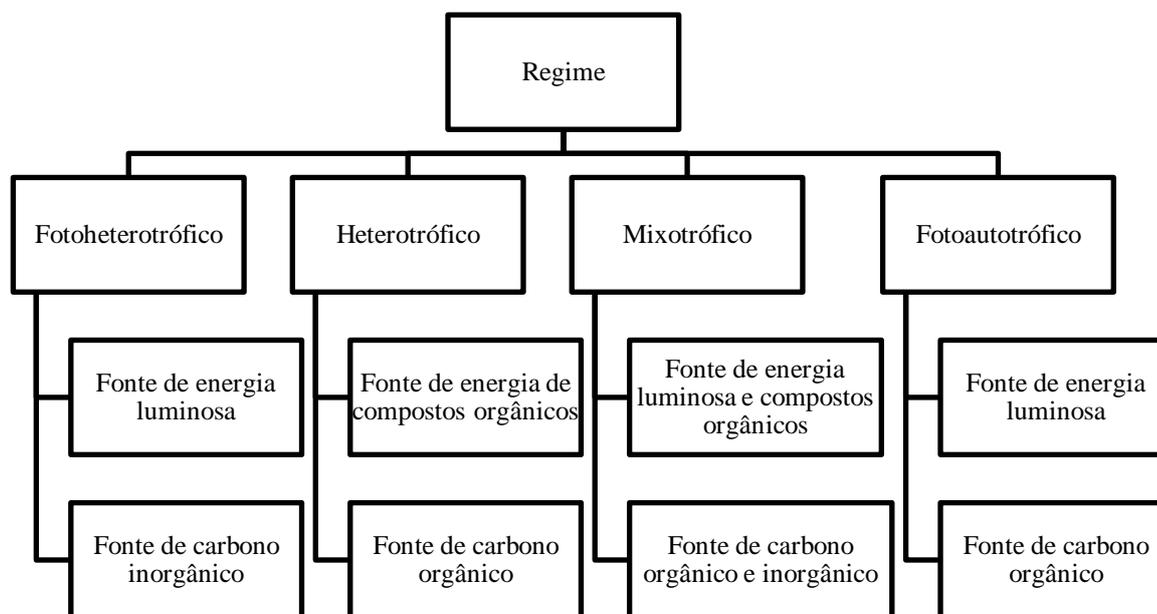


Figura 1. Características dos cultivos de microalgas quanto ao seu metabolismo.

Figure 1. Characteristics of microalgae cultures as to their metabolism.

Nos sistemas fotoautotróficos, a luz (solar ou sintética) é utilizada como principal fonte de energia e o CO₂ como fonte inorgânica de carbono para o crescimento das microalgas (Azeredo, 2012). Já em cultivos fotoheterotróficos, as microalgas utilizam a luz (solar ou sintética) e compostos orgânicos previamente adicionados ao meio de cultivo para seu crescimento (Vidal, 2016). Por sua vez, nos sistemas heterotróficos são utilizados compostos orgânicos como principal fonte de energia e carbono para o desenvolvimento das células, enquanto os sistemas mixotróficos necessitam de duas etapas: a primeira em sistema autotrófico e a segunda em sistema heterotrófico (Azeredo, 2012).

Cultivar microalgas em meio mixotrófico pode ser considerada uma alternativa para a produção fotoautotrófica. Um estudo com a microalga *Tetraselmis suecica* obteve grandes taxas de crescimento e agrupamento de biomassa em cultivo mixotrófico do que em cultivo autotrófico (Cid & Abalde, 1992). Heredia-Arroyo et al. (2010) cultivaram a microalga *C. protothecoides* nos regimes fotoautotrófico, heterotrófico e mixotrófico. Foi observada maior taxa de crescimento celular nos sistemas mixotrófico e heterotrófico. Além disso, não houve diferença

significativa de crescimento celular entre esses dois cultivos.

Sistemas utilizados para a produção de microalgas

O cultivo de microalgas pode ser realizado em pequena ou larga escala em sistemas classificados como fechados ou abertos. Os cultivos fechados são realizados em fotobiorreatores, enquanto os abertos são realizados em tanques de água ou *raceway* (Vieira, 2013). O tipo de sistema deve ser escolhido de acordo com as características biológicas da espécie de microalga selecionada, custos da área onde será alocado o tanque de cultivo, custo da mão-de-obra e da energia necessária para agitação, disponibilidade e custo da água e nutrientes, além do produto de interesse. Ao mesmo tempo deve-se considerar a necessidade da utilização de luz artificial, ajuste de temperatura, estresse hidrodinâmico e a prevenção de organismos contaminantes no meio de cultivo (Borowitzka, 1999).

Sistemas Abertos

Sistemas abertos são comumente utilizados para o cultivo de duas a seis espécies de microalgas com vários processos evolutivos, tendo como vantagem o crescimento rápido e tolerância a altos níveis de oxigênio dissolvido

no meio. Porém, esses sistemas estão sujeitos a alterações devido a incidência de chuvas e evaporação, assim como a produção de agentes tóxicos pelas células durante o seu desenvolvimento. Além disso, uma vez que não há limpeza contínua da água, existe a possibilidade do acúmulo crescente de matéria orgânica devido à morte e decomposição das microalgas (Shen et al., 2009).

O design dos sistemas abertos tem uma grande variedade de formas e tamanhos e compreendem as (i) lagoas abertas simples, onde não há mecanização para homogeneização do cultivo, (ii) *raceway*, que são pistas circulares, também conhecido como sistema de fluxo (Figura 2.A) e (iii) lagoas circulares (Figura 2.B), que apresentam um braço mecânico no centro (Becker, 1994).

Figura 2. Sistemas abertos utilizados para a produção de algas. A) *Raceway*, B) Lagoas circulares.

Figure 2. Open systems used for algae production. A) *Raceway pond*, B) *Circular pond*.



Fonte: Milano et al., 2016.

Os tanques abertos devem apresentar pequena profundidade para garantir a iluminação uniforme do cultivo e maior produtividade em biomassa (Borowitzka, 1999). Por outro lado, esses sistemas apresentam perdas de CO₂ para a atmosfera e estão sujeitos à variação de temperatura e evaporação do meio de cultivo (Benemann et al., 1997). O modelo mais utilizado é o *raceway paddle wheel mixed open ponds*, um tanque de fácil funcionamento com via de circulação contínua, evitando que as células sedimentem no fundo e permitindo

que recebam luz solar de maneira uniforme. Entretanto, esses tanques necessitam de alta demanda de energia elétrica para o seu funcionamento (Vieira, 2013).

Uma pesquisa envolvendo as microalgas *Chlorella* sp., *Spirulina* sp. e *Dunaliella salina* revelou que essas espécies são cultiváveis em sistemas abertos devido a sua capacidade de se desenvolver em ambientes altamente seletivos. Este fato torna possível o cultivo livre do prejuízo da contaminação por outros microrganismos (Colla et al., 2002).

Sistemas Fechados

Os sistemas fechados compreendem os fotobiorreatores. Para regimes autotróficos e mixotróficos, os mais utilizados são os tubulares, colunas e em placas (Eriksen, 2008). Os fotobiorreatores permitem a captação da luz pelas microalgas para a realização do processo de fotossíntese. Nesse sistema é possível evitar a contaminação por microrganismos invasores, não há perdas por evaporação, é possível realizar o controle de temperatura e pH, menor impacto ambiental, e os designs técnicos são flexíveis (Pulz, 1992; Mata, 2010).

A partir dos fotobiorreatores é possível controlar a maior parte dos parâmetros no cultivo de microalgas, possibilitando longos períodos de cultivos contínuos, resultando em alta produtividade celular (Chisti, 2008).

Como resultado, há maior produtividade de biomassa celular e redução do impacto ambiental causado pela eutrofização. Por outro lado, o cultivo em fotobiorreatores está sujeito a superaquecimento do meio de cultivo devido à proximidade da fonte de luz (quando artificial), além do acúmulo de material biológico e oxigênio (O₂). Além disso, ainda possuem custos de construção e operação elevados, tornando-os financeiramente inviáveis para produção de biomassa em escala industrial (Mata, 2010).

Fotobiorreatores Tubulares

Os fotobiorreatores tubulares podem ser aparelhados horizontalmente, inclinados na vertical ou em espiral (Richmond, 2004). A

instalação dos tubos deve maximizar a exposição à iluminação, de modo que o diâmetro e o tamanho dos tubos são considerados fatores limitantes. Os tubos devem apresentar no máximo 10 cm de diâmetro para garantir o suprimento de luz (Chisti, 2008) e o comprimento dos tubos deve evitar o acúmulo de oxigênio (O₂), fator que limita a fotossíntese. Oxigênio em excesso pode ocasionar a redução da produtividade de biomassa, resultando em variações de pH no meio de cultivo (Eriksen, 2008).

Fotobiorreatores em Placas

Os fotobiorreatores em placas são construídos por meio da junção de duas placas transparentes, as quais são posicionadas verticalmente ou inclinadas, oferecendo grande superfície de iluminação. Além da captação máxima de luz, esses fotobiorreatores não acumulam grandes quantidades de oxigênio dissolvido, levando à alta eficiência fotossintética (Brennan & Owende, 2010). Contudo, existem espécies de microalgas que aderem às paredes do fotobiorreator, impedindo a absorção da luz (Kochem, 2010).

Fotobiorreatores em Colunas

Nota-se, na Figura 3, os fotobiorreatores em coluna; estes possuem eficiência no processo de agitação, maior taxa de transferência de gases e maior controle das condições do meio de cultivo. São compostos por um sistema de bolhas para realizar a agitação e a transferência de gases (Eriksen, 2008). Uma desvantagem do sistema de bolhas é o desenvolvimento de ambiente hidrodinâmico, que causa estresse mecânico nas células (Suzuki-Matsuo et al., 1995).

Podem apresentar várias colunas e a unidade geradora de bolhas é acoplada na parte inferior de cada coluna. A agitação pode criar um efeito de *flashing*, aumentando a eficiência da captação de luz e assim, contribuindo com a transferência de gases (Azeredo, 2012).



Figura 3. Fotobiorreatores em coluna.

Figure 3. Photobioreactors in column.

Fonte: Loures, 2016.

istemas Mixotróficos

Os sistemas mixotróficos para cultivo de microalgas correspondem à combinação dos sistemas fechados (fotobiorreatores) e abertos (*raceway*), os quais têm como objetivo reduzir os custos do processo de produção de biomassa.

Na primeira fase é utilizado meio de cultivo rico em nutrientes e fatores bióticos e abióticos controlados para a produção de biomassa. Na segunda fase, a biomassa produzida é submetida a condições ambientais naturais, como a deficiência de nitrogênio e fósforo e a intensa exposição à iluminação. Sendo assim, os sistemas híbridos têm o intuito de aumentar a produtividade de células como também o conteúdo lipídico nas microalgas. Uma das principais vantagens dos sistemas híbridos é redução de contaminação do cultivo, uma vez que na primeira fase são utilizados fotobiorreatores em sistemas fechados (Azeredo, 2012).

O sistema híbrido foi utilizado pela primeira vez em 2007, com o objetivo de produzir biodiesel e astaxantina para amenizar as emissões de CO₂ de usinas termelétricas que utilizavam combustíveis fósseis. Nesse estudo os autores obtiveram produtividade de 10,2-36,4 g/m²d e 25% de conteúdo lipídico (Huntley et al., 2007).

Com o intuito de aumentar o conteúdo lipídico por meio do estresse e da deficiência de nutrientes sob alta luminosidade, outro estudo foi realizado utilizando o mesmo tipo de sistema., no qual 22% do cultivo foi realizado em fotobiorreatores sob condições ótimas e controladas, e os 78% restantes foram cultivados em sistemas abertos. Os autores obtiveram 28 g/m²d de produtividade de lipídeos nesse modelo (Rodolfi et al., 2009).

Biorreatores para Produção Heterotrófica

As espécies de microalgas que não necessitam da luz para seu desenvolvimento são conhecidas como heterotróficas. Todavia, dependem de uma fonte de carbono orgânica adicionada ao meio de cultivo, como glicose, por exemplo. Portanto, as microalgas heterotróficas podem ser cultivadas em sistemas envolvendo biorreatores ou fermentadores com a inserção de substrato orgânico como fonte de carbono (Eriksen, 2008).

Sistemas heterotróficos possuem vantagens quando comparados com os fotoautotróficos, como a isenção da utilização de luz solar ou artificial. Além disso, a ampliação de escala é mais simples em relação ao tamanho do reator, ao sistema de agitação, de transferência de gases e de produtividade, já que não é obrigatório haver uma analogia entre superfície e volume (Eriksen, 2008).

Li et al. (2007) indicaram que o sistema heterotrófico para produção de biomassa de microalgas apresenta grande potencial para a produção de biodiesel em grande escala. Estudos com a microalga *Chlorella protothecoides* cultivada heterotroficamente em laboratório (5 L), planta piloto (750 L) e em biorreatores comerciais (11000 L) relataram alta taxa de produtividade e de conteúdo lipídico (50%) nas células, representando um aumento de 1,5 a 2 vezes quando comparado a sistemas autotróficos que, apesar da capacidade de utilizar a luz, as microalgas cultivadas nesse sistema apresentam baixa taxa de crescimento devido à pouca disponibilidade de luz quando cultivadas em larga escala ou quando atingem elevada densidade celular, e até mesmo

quando ocorre a fotoinibição causada pelo excesso de luz (Ragni, 2008).

Cultivo de Microalgas em Efluentes

Cultivar microalgas em águas residuais pode ser considerada uma opção para reduzir os custos de produção e reduzir os impactos ambientais causados pela eutrofização. As microalgas utilizam compostos orgânicos e inorgânicos para seu crescimento, contribuindo para o tratamento de resíduos por meio da redução de nitrogênio e fósforo presentes em grandes concentrações nos efluentes (Miyawaki, 2014).

O cultivo de microalgas em efluentes facilita o acesso a diversos meios de cultivo obtidos de matérias orgânicas e inorgânicas (Órpez et al., 2009; Dicknson et al., 2013; Tuanted et al., 2014). Dessa forma, cultivar microalgas em efluentes (sistema mixotrófico) proporciona maior rendimento da biomassa produzida, uma vez que as células são capazes de assimilar as fontes orgânicas e inorgânicas de carbono disponíveis no meio (Radmann et al., 2009).

Uma técnica considerada altamente sustentável e que objetiva controlar a qualidade da água é a tecnologia de bioflocos. A biofloculação é realizada por meio da adição de carbono orgânico no sistema, o qual não sofre trocas de água ao longo do cultivo (Avnimelech, 2007; Azim & Little, 2008; Crab et al., 2012). Esse tipo de sistema permite a reciclagem de nutrientes por meio da relação carbono/nitrogênio na água, estimulando a produção de biomassa microbiana e suplementação do cultivo (Avnimelech, 2007).

O uso desse sistema é justificado pela reutilização de água, havendo pouca ou nenhuma renovação. Compostos nitrogenados são assimilados pela biomassa formada no próprio ambiente de cultivo, reduzindo o risco de contaminação (Tacon et al., 2002; Crab et al., 2009). A desvantagem desse tipo sistema é o acúmulo de nutrientes, principalmente de nitrogênio e fósforo na água de cultivo devido a alta densidade de estocagem e pouca troca de água (Krummenauer et al., 2011).

Um estudo utilizando efluente doméstico com cultivo da microalga *Desmodesmus subspicatus* adaptada em cultivo com efluente universitário reportou 90% de eficiência na remoção de matéria orgânica. O efluente resultante foi classificado como adequado para adubação do solo cultivado com *Zantedeschia aethiopica* (Fonseca et al., 2015). O sistema utilizado neste estudo é demonstrado na Figura 4.

Outro aspecto importante na utilização de microalgas em sistemas de tratamento de efluentes é o aproveitamento da biomassa microalgal produzida, que pode ser utilizada para extrair lipídeos e posterior conversão em biocombustíveis de terceira geração (Rodolfi et al., 2009).

Biocombustíveis

Os biocombustíveis são combustíveis derivados de materiais biológicos, como matéria orgânica morta não fossilizada, como também nativos de produtos metabólicos de organismos vivos, como o óleo vegetal para a produção de biodiesel (Demirbas, 2009). Ganham destaque mundial devido ao aumento da preocupação com os efeitos adversos das mudanças climáticas, como o efeito estufa e o aquecimento global. A Figura 5 ilustra e explica, de forma resumida, como a emissão de gases gerados a partir da queima de biocombustíveis e de combustíveis fósseis pode afetar o efeito estufa.

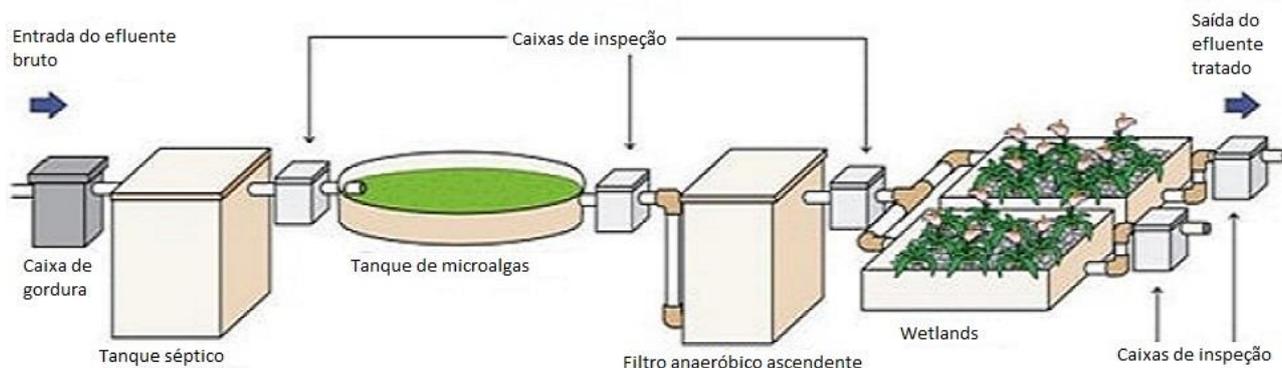


Figura 4. Ilustração esquemática da estação de tratamento de esgoto instalada no Campus Araras da UFSCar.

Figure 4. Schematic illustration of sewage treatment plant installed at UFSCar Campus Araras. Fonte: Pulschen et al., 2013.

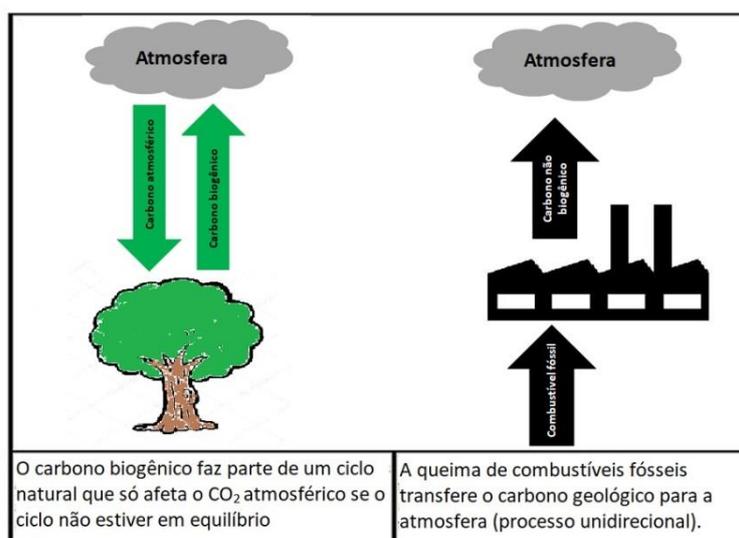


Figura 5. Comparação da emissão de gases gerados por energia verde e combustíveis fósseis.

Figure 5. Comparing the emission of gases generated by green energy and by fossil fuels.

Contudo, algumas dificuldades vêm sendo descritas quanto à utilização de fontes oleaginosas para a síntese de biodiesel. Uma delas é o uso do solo, pois são necessárias grandes extensões de terras agricultáveis disponíveis, o que pode competir com a produção de alimentos, uma vez que muitos países enfrentam sérios problemas de fome e insuficiência de água (Varela, 2014). Portanto, a produção de biocombustíveis a partir de microalgas surge como alternativa para a reversão desse quadro, já que seu cultivo não compete por espaço com a produção de alimentos (Miranda, 2011).

CONCLUSÃO

Os sistemas mixotróficos garantem maior produtividade de biomassa quando comparado aos outros tipos de sistemas de cultivo. Por ser composto de duas fases, este aumenta a produtividade celular, além de reduzir os riscos de contaminação do meio de cultivo, pois a primeira fase é realizada em sistemas fechados.

Além disso, levando em consideração a degradação do solo ambiental causada pelo acúmulo de nutrientes e a alta demanda de CO₂ na atmosfera, o cultivo de microalgas é uma alternativa viável para conservar a biodiversidade do planeta e manter o equilíbrio da emissão de gases no efeito estufa e, enquanto o cultivo de microalgas em efluentes promove a limpeza dessas águas, as quais podem ter um destino apropriado sem prejudicar o meio ambiente. Além disso, biomassa resultante pode ser utilizada para outros fins como a produção de biocombustíveis de terceira geração; uma alternativa sustentável para equilibrar a emissão de gases na atmosfera que contribuem para o efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, E.T. **Aproveitamento de glicerol como suplemento nutricional no desenvolvimento de microalgas: prospecção para obtenção de biomassa e lipídios.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental), Universidade de Santa Cruz do Sul, 2017.
- ANDRADE, M.D.R.; COSTA, J.A.V. Culture of microalga *Spirulina platensis* in alternative sources of nutrients. **Ciência e agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1551-1556, 2008.
- AVNIMELECH, Y. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. **Aquaculture**, v. 264, n. 1-4, p. 140-147, 2007.
- AZEREDO, V. B. S. **Produção de biodiesel a partir do cultivo de microalgas: estimativa de custos e perspectivas para o Brasil.** Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012. 171f.
- AZIM, M. E.; LITTLE, D. C. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Aquaculture**, v. 283, n. 1-4, p. 29-35, 2008.
- BASTOS, R. G.; DE ALBUQUERQUE BONINI, M. Produção de biomassa de microalgas a partir de cultivo mixotrófico em acetato. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 17, n. 1, p. 38-44, 2017.
- BECKER, E. Wolfgang. **Microalgae: biotechnology and microbiology.** Cambridge University Press, 1994.
- BECKER, W. **Microalgae in human and animal nutrition. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology,** Amos Richmond, Ed. 2004.
- BENEMANN, J. R. CO₂ mitigation with microalgae systems. **Energy conversion and management**, v. 38, p. 475-479, 1997.
- BOROWITZKA, M. A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. **Journal of biotechnology**, v. 70, n. 1-3, p. 313-321, 1999.
- BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae - a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2010.
- CARRIJO, R. D. S., *et al.* Determinação da concentração ótima de meio de cultura para a microalga *Spirogyra* sp e de possíveis crioprotetores para sua conservação. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 6, n. 1, 2017.

- CARVALHO, J. D. Energia verde. **Ciência Hoje**, v.39 n,232, p. 28-33, 2006.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. **Trends in biotechnology**, v.26, n.3, p. 126-131, 2008.
- CID, A.; ABALDE, J.; HERRERO, C. High yield mixotrophic cultures of the marine microalga *Tetraselmis suecica* (Kyllin) Butcher (Prasinophyceae). **Journal of Applied Phycology**, v.4, n.1, p. 31-37, 1992.
- COLLA, L.; RUIZ, W. A.; COSTA, J. A. V. Metabolismo de carbono e nitrogênio em microalgas. **Vetor**, v.12, p. 61-78, 2002.
- CRAB, R., *et al.* Bio-flocs technology application in over-wintering of tilapia. **Aquacultural Engineering**, v. 40, n. 3, p. 105-112, 2009.
- CRAB, R., *et al.* Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. **Aquaculture**, v. 356, p. 351-356, 2012.
- DASGUPTA, C. N., *et al.* Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 19, p. 10218-10238, 2010.
- DE LA NOUE, J.; DE PAUW, N. The potential of microalgal biotechnology: a review of production and uses of microalgae. **Biotechnology advances**, v. 6, n. 4, p. 725-770, 1988.
- DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy conversion and management**, v. 50, n. 1, p. 14-34, 2009.
- DICKINSON, K. E.; WHITNEY, C. G.; MCGINN, P. J. Nutrient remediation rates in municipal wastewater and their effect on biochemical composition of the microalga *Scenedesmus sp.* AMDD. **Algal Research**, v. 2, n. 2, p. 127-134, 2013.
- DUTTA, P. K.; RADNER, R. A strategic analysis of global warming: Theory and some numbers. **Journal of Economic Behavior & Organization**, v. 71, n. 2, p. 187-209, 2009.
- ERAZO, P.; TRINDADE, R. G. **Isolamento, seleção e cultivo em meio sintético e vinhaça de microalgas com potencial para a produção de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Ilha Solteira, 2017.
- ERIKSEN, N. T. The technology of microalgal culturing. **Biotechnology letters**, v. 30, n. 9, p. 1525-1536, 2008.
- FERREIRA, S. P.; COSTA, J. A. V. Conteúdo Lipídico da Biomassa de *Chlorella homosphaera* Cultivada de Modo Heterotrófico sob Diferentes Concentrações de Carbono e Nitrogênio. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 116, n. 1, p. 19-28, 2017.
- FLORIDES, G. A.; CHRISTODOULIDES, P. Global warming and carbon dioxide through sciences. **Environment international**, v. 35, n. 2, p. 390-401, 2009.
- FONSCECA, C. S., *et al.* Eficiência de estação de tratamento de esgoto doméstico visando reuso agrícola. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, 2015.
- GONÇALVES, B. C. M., *et al.* Microalgas para Produção de Biohidrogênio e Biodiesel. **Janus**, v. 12, n. 22, 2015.
- HEREDIA-ARROYO, T.; WEI, W.; HU, B. Oil accumulation via heterotrophic / mixotrophic *Chlorella protothecoides*. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 162, n. 7, p. 1978-1995, 2010.
- HUNTLEY, M. E.; & REDALJE, D. G. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 12, n. 4, p. 573-608, 2007.
- KHAN, S. A., HUSSAIN, M. Z., PRASAD, S. & BANERJEE, U. C. Prospects of biodiesel production from microalgae in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2361-2372, 2009.
- KOCHEM, L. H. **Caracterização de fotobioreator airlift para cultivo de microalgas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- KRAMER, C. A. C. **Oxidação da parede celular da microalga Chlamydomonas sp. para extração de lipídios e avaliação da sua qualidade para síntese de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- KRUMMENAUER, D., *et al.* Superintensive culture of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in a biofloc technology system in southern Brazil at different stocking densities. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 42, n. 5, p. 726-733, 2011.
- LI, X., *et al.* Large-scale biodiesel production from microalga *Chlorella protothecoides* through heterotrophic cultivation in bioreactors. **Biotechnology and bioengineering**, v. 98, n. 4, p. 764-771, 2007.
- LI, Y., *et al.* Characterization of a microalga *Chlorella sp.* well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. **Bioresource technology**, v. 102, n. 8, p. 5138-5144, 2011.

- LIMA, A. A. D. C. **Extração de óleo da microalga *Choricystis minor* var. *minor* em sistemas pressurizados e avaliação de suas propriedades para aplicação em biodiesel.** Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Paraná, 2017.
- LOAICIGA, H. A., *et al.* Global warming and the hydrologic cycle. **Journal of Hydrology**, v. 174, n. 1-2, p. 83-127, 1996.
- LOURENÇO, S.O. **Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações.** São Carlos: RiMa. 2006.
- LOURES, C. C. A. 2016. **Otimização do processo de cultivo da microalga *Chlorella minutissima* como fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Guaratinguetá, 2016.
- MATA, T. M., MARTINS, A. A. & CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 1, p. 217-232, 2010.
- MIAO, X.; WU, Q. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. **Bioresource technology**, v. 97, n. 6, p. 841-846, 2006.
- MILANO, J., *et al.* Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, n. 180-197, 2016.
- MIRANDA, J. R. P. D. C. **Produção de bioetanol a partir da microalga *Scenedesmus obliquus*.** Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011. 102f.
- MIYAWAKI, B. **Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- NASCIMENTO, R. C. D. **Cultivo de microalgas em fotobiorreatores de placas planas para a produção de biomassa e biorremediação de efluente da agroindústria de óleo de palma.** Dissertação (Mestrado em Biotecnologia), Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Gurupi, 2016.
- ÓRPEZ, R., *et al.* Growth of the microalga *Botryococcus braunii* in secondarily treated sewage. **Desalination**, v.246, n.1-3, p. 625-630, 2009.
- PEREIRA, G. H. M. **Cultivo da microalga *Nannochloropsis oculata* em batelada alimentada.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Aquicultura), Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- PULSHEN, A., *et al.* Tratamento biológico de efluentes sanitários em ETE mista. **Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento De Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, v. 3, 2013.
- PULZ, O. Cultivation techniques for microalgae in open and closed ponds. **Proceedings of the 1st European workshop on microalgal biotechnology**. Potsdam, p. v. 61. 1992.
- RADMANN, E., *et al.* Cultivo Mixotrófico da microalga *Spirulina* sp. LEB-18 com adição noturna de diferentes fontes de Carbono orgânico. **XVII Simpósio Nacional de Bioprocessos**, 2009.
- RAGNI, M., *et al.* Photoinhibition of psii in *Emiliania huxleyi* (*haptophyta*) under high light stress: the roles of photoacclimation, photoprotection, and photorepair 1. **Journal of Phycology**, v. 4, n. 3, p. 670-683, 2008.
- RICHMOND, A. **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology.** John Wiley & Sons, 2008
- RIDGWELL, A., *et al.* Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering. **Current Biology**, v. 19, n. 2, p. 146-150, 2009.
- RODEOLFI, L., *et al.* Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. **Biotechnology and bioengineering**, v. 102, n. 1, p. 100-112, 2009.
- SHEN, Y., *et al.* Effect of nitrogen and extraction method on algae lipid yield. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 2, n. 1, p. 51-57, 2009.
- SUALI, E.; SARBATLY, R. Conversion of microalgae to biofuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4316-4342, 2012.
- SUZUKI, T. Gas-Sparged bioreactors for CO₂ fixation by *Dunaliella tertiolecta*. **Journal of chemical technology and biotechnology**, v. 62, n. 4, p. 351-358, 1995.
- TAN, C. H. Novel approaches of producing bioenergies from microalgae: A recent review. **Biotechnology advances**, v. 33, n. 6, p. 1219-1227, 2015.
- TACON, A. G. J., *et al.* Effect of culture system on the nutrition and growth performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) fed different diets. **Aquaculture nutrition**, v. 8, n. 2, p. 121-137, 2002.
- TUANTED, K., *et al.* Microalgae growth on concentrated human urine. **Journal of applied phycology**, v. 26, n. 1, p. 287-297, 2014.
- VARELA, M. C.; CARVALHO, R. G. Viabilidade ambiental para a criação de unidades de conservação na

Ilha da Coroa, Mossoró-RN. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 2, 2014.

VIDAL, I. C. D. A. **Estudo da potencialidade de produção de biocombustíveis entre as microalgas *Chlorella sp.* e *Scenedesmus sp.* cultivadas em águas residuárias.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

VIEIRA, T.D.Q. **Uso de resíduos líquidos no cultivo da microalga *Chlorella sp.* com potencial para produção de biocombustíveis.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Estadual do Paraíba, Campina Grande, 2013.

ZORN, S. M. F. E., et al. Extração de Óleo Microalgal por Solventes Orgânicos: Uma Alternativa para a Produção de Biodiesel. **Janus**, v. 13, n. 24, 2017.

ZORN, S. M. F. E. Avaliação dos Fatores envolvidos na Extração de Lipídios da Biomassa da Microalga *Chlorella minutissima* Via Solventes. **HOLOS**, v. 2, p. 66-79, 2017.