

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL E BIORREMEDIAÇÃO DAS MICROALGAS *DUNALIELLA* *TERTIOLECTA* E *CHLORELLA VULGARIS*: UMA REVISÃO DO CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

Djalma Queiroga de Assis Neto¹
Ayrton Natthan Silva Ramos²
Marcelo Henrique Marreiros e Silva³
Weruska Brasileiro Ferreira⁴

RESUMO

O aumento acelerado da população no último século acarretou em diversos problemas ambientais. Entre eles, podem-se citar: a demanda por fontes energéticas menos degradantes ao meio ambiente, que vem aumentando cada vez mais, como também a busca por formas de tratamento mais eficazes para as águas residuárias poluentes lançadas na natureza. Tendo isso em mente, este trabalho trata-se de uma revisão sistemática de literatura dos últimos sete anos (2014-2020), a fim de sintetizar e discutir as inovações nos métodos de cultivo das microalgas *Dunaliella tertiolecta* e *Chlorella vulgaris* e seu potencial para biorremediação de efluentes e produção de biocombustível, analisando o cenário atual das tecnologias que visam aumentar a eficácia neste campo. A revisão teve como fonte de busca as bases de dados *Scopus* e *SciELO*. Foi observado que as espécies em questão apresentam não só uma promissora eficiência na biorremediação de nutrientes e metais pesados, entre outros, como também são uma fonte alternativa vantajosa para a produção de biocombustíveis, ante as que já estão em uso.

Palavras-chave: *Dunaliella tertiolecta*, *Chlorella vulgaris*, biorremediação, biocombustível.

INTRODUÇÃO

No último século, o crescimento exponencial da população, juntamente com a globalização e conseqüente desenvolvimento de novas tecnologias, acarretou numa alta demanda energética. No entanto, as energias não renováveis ainda são as mais utilizadas na atualidade, todavia, apresentam problemas tanto por serem recursos esgotáveis, não podendo desta maneira, suprir a demanda que será requisitada nos anos subseqüentes, como também, em sua maioria, possuem um alto potencial poluidor (TEIXEIRA; TAOUIL, 2010).

¹ Mestrando do Curso de Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, djalmaqueiroganeto@gmail.com;

² Graduando pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, ayrtonatthan17@gmail.com;

³ Graduando pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, marcelohmes@gmail.com;

⁴ Professora Doutora do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, weruska_brasileiro@yahoo.com.br;

A título de exemplo, a demanda por petróleo está pressionando enormemente a oferta finita de energia e produtos químicos derivados de combustíveis fósseis. Por esse e outros motivos, é necessário o desenvolvimento de cadeias alternativas de produção nos setores de energia e química, a fim de reduzir a dependência de petróleo e outros recursos finitos (SIALVE et al., 2014).

Outro problema decorrente desse aumento populacional é a poluição proveniente do despejo inadequado de esgoto não tratado ou tratado de forma inadequada, que podem ocasionar a degradação da qualidade da água do corpo receptor desses efluentes, gerando riscos à saúde da população e aumentando os custos associados ao tratamento de água (PAIVA; SOUZA, 2018).

Sendo assim, um dos maiores desafios aliados à urbanização acelerada é como lidar de forma adequada com as águas residuárias municipais, pois o despejo inadequado desses efluentes em corpos hídricos ocasiona um excesso de nutrientes e outros poluentes que aceleram o processo de eutrofização e, conseqüentemente, a deterioração de sua qualidade (CHAUDHARY et al., 2020).

Neste contexto, surgem as microalgas, que além de terem sido amplamente investigadas como fontes de produtos químicos, cosméticos, produtos de saúde e suplementos alimentares para animais e humanos, apresentam valor energético se configuram como uma fonte de energia renovável. De fato, organismos fotossintéticos como plantas, algas e cianobactérias superiores, são capazes de usar a luz solar e o dióxido de carbono (CO_2) para produzir valiosas moléculas orgânicas, como carboidratos, lipídios, pigmentos e fibras. Nos últimos anos, as pesquisas se voltaram a essa biomassa, principalmente a aquelas que visam aos processos de produção de biocombustíveis e produtos bioquímicos (SIALVE et al., 2014).

Quando comparado com outras fontes de biocombustíveis, como milho ou soja, as microalgas apresentam quantidade superior de óleo produzido em sua biomassa. Além disso, demandam uma área bem inferior por litro de óleo produzido, representando assim uma produtividade por hectare bastante eficiente (MATA et al., 2010).

Por conseguinte, é necessário otimizar a multiplicação das microalgas e sua remoção de nutrientes quando cultivadas com águas residuárias. Assim, muitas estratégias foram propostas, como a diluição e ajuste das propriedades físico-químicas das mesmas, além da otimização dos parâmetros operacionais para que sua utilização se torne viável e eficiente (CHANG et al., 2020).

Outro ponto de elevado interesse é que as microalgas têm a capacidade de absorver nitrogênio e fósforo, nas águas residuárias, como fonte de nutrientes e fixar o CO_2 como fonte

de carbono para a fotossíntese e gerar biolipídios, carboidratos e proteínas (ZHU et al., 2018), denotando que o cultivo de microalgas com águas residuárias pode reduzir simultaneamente o custo relacionado ao seu descarte, mitigação de carbono e produção de bioenergia baseada em sua biomassa (FU et al., 2019).

Da mesma forma, é possível remover outros nutrientes das águas residuárias ao empregar microalgas como elemento chave nos tratamentos biológicos. Essa biorremediação é um método ecológico benéfico que oferece a vantagem de ser um meio de baixo custo para a remoção de nutrientes, ademais, a biomassa produzida através da biorremediação pode ter usos polivalentes, incluindo combustíveis, fertilizantes, produção de produtos químicos finos e alimentos para a aquicultura (ANDREOTTI et al., 2017).

As microalgas são fontes de energia renováveis com densidade de energia suficientemente alta para substituir o carvão usado sem diminuir a eficiência térmica das caldeiras, por exemplo. De fato, uma avaliação do ciclo de vida (ACV) mostrou que as emissões de CO₂ podem ser reduzidas na usina convencional de queima de carvão quando até 1% do consumo de carvão é substituído por microalgas secas (GIOSTRI et al., 2016).

Outra informação adicional é que o estresse nutricional como privação de nitrogênio, fósforo e suplementação de ferro podem potencializar o conteúdo lipídico em muitas espécies de microalgas, aumentando, portanto, a sua viabilidade como meio de produção de biocombustível (BENHIMA et al., 2018).

Dentre várias espécies, a *Dunaliella Tertiolecta* é uma microalga verde marinha do gênero *Dunaliella* que destaca por possuir a capacidade de ser cultivada nas mais variadas condições de salinidade e nutrientes, podendo ser usada para remediação de águas residuárias, além de produzir lipídios úteis para geração de biocombustíveis (CHOI et al., 2019). A *Chlorella vulgaris* também é uma das espécies mais promissoras no sequestro de carbono e na produção desse tipo de combustível (CANCELA et al., 2019).

Tendo em vista que ambas as microalgas se demonstram bastante auspiciosas como fontes de energia renováveis e que conseguem realizar processos de biorremediação de nutrientes presentes em águas residuárias e outros tipos de resíduos, este trabalho tem como objetivo realizar uma síntese dos recentes avanços no campo da biorremediação e biocombustíveis através das microalgas *Dunaliella tertiolecta* e *Chlorella vulgaris*, bem como as perspectivas futuras para a área.

Este trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica sistemática e descritiva, com caráter exploratório e quantitativo. A pesquisa foi realizada a partir de uma amostragem de artigos publicados na base de dados *Scopus* e *SciELO* (*Scientific Electronic Library Online*), entre os anos de 2014 a 2020. Os descritores booleanos utilizados na busca foram: *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella tertiolecta*, *bioremediation* e *biofuel*.

O presente estudo foi realizado a partir de leitura, análise e comparação de artigos científicos relacionados à biologia e engenharia no âmbito de microalgas e suas aplicações em processos de biorremediação e produção de biocombustível, tendo como ênfase as microalgas *Chlorella vulgaris* e *Dunaliella tertiolecta*.

Como critérios de inclusão foram levados em conta: o ano de publicação dos artigos, entre 2014 a 2020, manter ligação com o tema da sustentabilidade e possuir correlação entre dois ou mais dos descritores. E os critérios de exclusão foram: artigos que não se relacionavam com biorremediação e/ou biocombustível, apesar de apresentarem pelo menos uma das microalgas, e trabalhos de contexto revisional.

A busca pelos descritores e suas combinações resultaram em um total de 726 respostas. A partir dos critérios de inclusão e exclusão, foi chegado a um total de 18 artigos, os quais foram usados como base para a revisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os trabalhos utilizados no presente trabalho podem ser observados sumariamente nas Tabelas 1 e 2. Estes foram de elevada contribuição para o entendimento do cenário atual da utilização das microalgas *Chlorella vulgaris* e *Dunaliella tertiolecta* nos campos da produção de biocombustível e tratamento de águas residuárias.

Tabela 1: Descrição dos artigos relacionados à produção de biocombustível através de microalgas.

Biocombustível					
Fonte	Microalga	Diferença no Cultivo	Biomassa (g/L)	Teor Lipídico (%)	Produtividade Lipídica (g/L)
El Aroussi et al. (2017)	Gênero <i>Dunaliella</i>	Incorporação de silicato	0,23 - 0,82	50	-
El Aroussi et al. (2015)	<i>D. tertiolecta</i>	Incorporação de fertilizante (2,4-D) e estresse salino	-	69,6	-
KUMAR et al.	<i>D. tertiolecta</i>	Incorporação de	1,89	-	0,52

(2018)		fertilizante (NPK)			
Rizwan et al. (2017)	<i>D. tertiolecta</i>	Incrementação de Ferro	-	35	-
Chang et al. (2020)	<i>C. vulgaris</i>	Cultivo em concentrado salino e utilização de eletro oxidação	1,27	38,7	0.49
Choi et al. (2019)	<i>C. vulgaris</i>	Meio trifosfato (TP)	> 3,0	41	-
Sánchez-Saavedra et al. (2020)	<i>C. vulgaris</i>	Uso de diferentes tipos de frequências de luz	0,27	18,74	-

Tabela 2: Descrição dos artigos relacionados à biorremediação através de microalgas.

Biorremediação			
Fonte	Microalga	Compostos em Destaque	Taxa de Redução
Andreotti et al. (2017)	<i>D. tertiolecta</i>	Fósforo e Nitrogênio	~91,96-95,44%
Akbarzadeh e Shariati (2014)	Gênero <i>Dunaliella</i>	Alumínio	~100% (decantado, até concentração de 8 mil)
Wu et al. (2017)	<i>D. tertiolecta</i>	Orto-fosfato, nitrato e amônia	83,7%-98,4%
Shirazi et al. (2018)	<i>D. tertiolecta</i>	Fosfato, flúor e Nitrogênio	~93-100%
Subashini e Rajiv (2018)	<i>C. vulgaris</i>	DQO, DBO, sólidos totais em suspensão, fosfato, nitrogênio amoniacal e cloro	39,14-75%
El-Kassas e Mohamed (2014)	<i>C. vulgaris</i>	DQO e corantes	69,9-75,68%
Chaudhary et al. (2020)	<i>C. vulgaris</i>	DQO, ortofosfato e amônia	84,6-92,8%
Zhou et al. (2014)	<i>C. vulgaris</i>	Fósforo e nitrogênio	82,2-92,3%
Ajala e Alexander (2019)	<i>C. vulgaris</i>	Nitrato e fosfato	87,3-93,1%
Chang et al. (2020)	<i>C. vulgaris</i>	DBO, NH ₄ , NO ₃ e PO ₄ ³⁻	66,3-100%

Das e Deka (2019)	<i>C. vulgaris</i>	Hidrocarbonetos de Petróleo	~98,63%
-------------------	--------------------	-----------------------------	---------

Dunaliella tertiolecta

O gênero *Dunaliella* e a espécie *Dunaliella tertiolecta* vem ganhando espaço na área de biorremediação de efluentes, em particular os com alto teor de salinidade. Essa preferência se dá ante a capacidade dessas microalgas de tolerar altos níveis de sais, além do fato de sua biomassa possuir alto teor lipídico, que é de grande importância na produção de biocombustíveis (PHONG VO et al., 2019).

Nesse contexto e devido à capacidade do gênero *Dunaliella* de aglutinação e sedimentação de células na presença de alumínio, Akbarzadeh e Shariati (2014), em sua pesquisa, utilizaram duas espécies do gênero *Dunaliella* para remediação de alumínio. As espécies foram a *Dunaliella salina* e a *Dunaliella bardawil*. O cultivo foi realizado em meio Johnson Modificado (SHARIATI; LILLEY, 1994), com pH 7,5, agitação a 1200 rpm, temperatura de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ e intensidade de luz de $100 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ com 16 horas de exposição diária. No meio foram adicionadas diferentes concentrações de AlCl_3 para verificação da capacidade de remediação do mesmo.

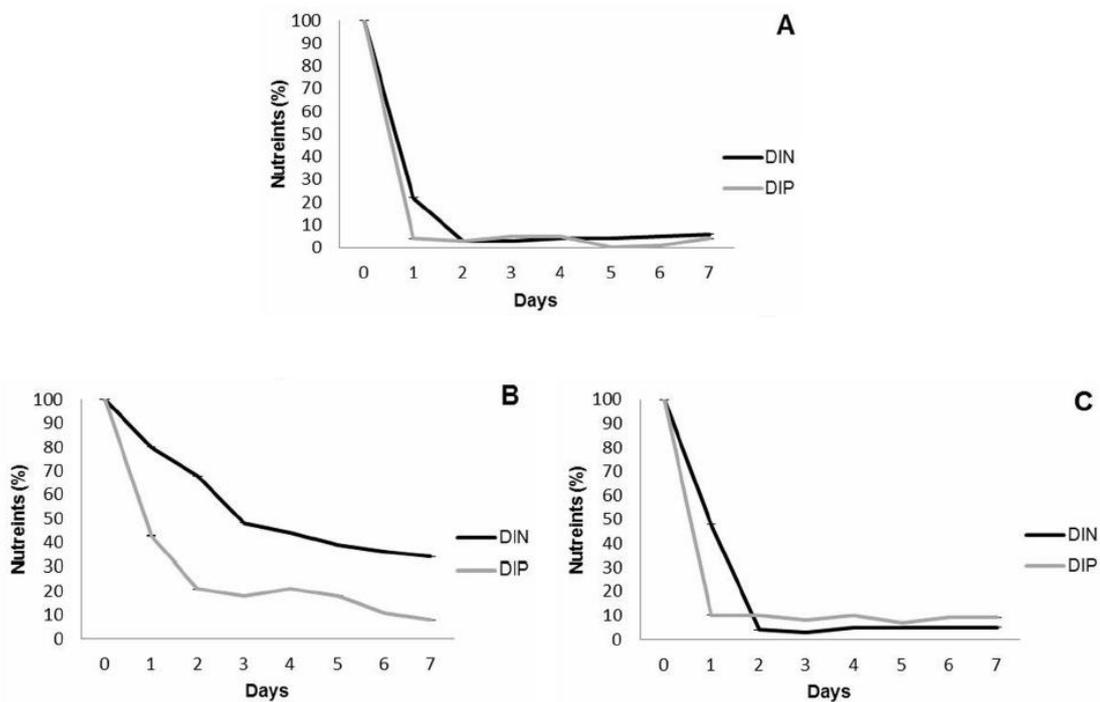
As microalgas do gênero *Dunaliella* se mostraram como propícias à remediação de alumínio, confirmando a capacidade das espécies estudadas de sedimentação e consequente remoção do mesmo. Salientando assim, a capacidade dessas espécies de serem utilizadas no tratamento de águas residuárias com presença de alumínio. A escassez de estudos nessa área utilizando o gênero mostra um campo pouco explorado e promissor para futuras pesquisas.

Da mesma forma, o estudo de biorremediação de nutrientes através de microalgas é de grande importância, visto que a presença em excesso dos mesmos pode contaminar os corpos hídricos. Em estudo, Andreotti et al. (2017) avaliaram a capacidade de biorremediação de nutrientes (fósforo e nitrogênio) através das espécies *Tetraselmis suecica*, *Isochrysis galbana* e *Dunaliella tertiolecta* em água residuária de aquacultura. A pesquisa se desenvolveu em fotobiorreatores de coluna em cultivos de 7 dias, com iluminação constante e intensidade de luz de $155 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, aeração contínua e temperatura de 23°C . Em seus resultados, fica explícito na Figura 1, o grande potencial da *Dunaliella tertiolecta* (C) em relação à *Isochrysis galbana* (B), já que em poucos dias a *Dunaliella* removeu uma grande porcentagem tanto de Fósforo Inorgânico Dissolvido (DIP) como de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (DIN),

(83) 3322.3222 enquanto a *I. galbana* precisou de muito mais tempo para alcançar esse feito, o que demonstra

sua eficácia. A outra microalga estudada, *Tetraselmis suecica* apresentou resultados semelhantes a *D. Tertiolecta*, tendo também grande capacidade promissora na biorremediação, ambas mostrando praticidade e velocidade na remoção desses nutrientes. A eficiência de remoção foi mensurada através da diferença entre a quantidade inicial e final de nutrientes.

Figura 1: Remoção de nutrientes pelas microalgas *T. suecica* (A), *I. galbana* (B) e *D. tertiolecta* (C)



Fonte: Andreotti et al. (2017)

Percebe-se uma elevada eficiência de remoção de Fósforo Inorgânico Dissolvido (DIP) e Nitrogênio Inorgânico Dissolvido (DIN) pelas espécies em estudo, com taxas de remoção superiores a 90% para as espécies *T. suecica* e *D. tertiolecta* (ANDREOTTI et al., 2017).

Vale ressaltar a necessidade de analisar a capacidade de cultivo da microalga nas mais variadas condições, como em um meio salino de água residuária, por exemplo, e a partir desses cultivos analisar suas aplicações. O estudo de WU et al. (2017) mostra a aplicação da *D. tertiolecta* em condições salinas de cultivo. A microalga foi cultivada com efluente salino de tratamento de esgoto local diluído em meio L1 de Guillard (GUILLARD; HARGRAVES, 1993) com 12 horas de exposição de luz e intensidade de $125 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ em uma temperatura de 24°C . Inicialmente, foi avaliado o efeito da aeração do cultivo com CO_2 , onde

foi percebido que a aeração com 5% de CO₂ e ar ambiente trouxe uma maior eficiência, tanto na taxa de crescimento das microalgas, como na remoção de nutrientes.

A partir dessa aeração, foram testados cultivos com diferentes teores de salinidade analisando qual deles apresentou melhor remoção de nutrientes e maior produção lipídica. O cultivo que teve resultados mais favoráveis foi o com teor de salinidade de 15 PSU, o qual conseguiu uma remoção de nitrogênio total, amônia e nitrato de 83,7, 79,07 e 98,4%, respectivamente. além disso, foi obtido uma produção de 0,463 g.L⁻¹.dia⁻¹ de biomassa e uma porcentagem lipídica de 41,6% (WU et al., 2017), o que demonstra que essa espécie se apresenta viável para biorremediação e produção de biocombustível.

De forma semelhante, Shirazi et al. (2018) estudou o cultivo da microalga *D. tertiolecta* em um meio concentrado de tratamento de dessalinização. As condições de cultivo foram: 16 horas de luminosidade diária, com uma temperatura de 30±2°C por 10 dias e aeração constante. Foram comparados meios com 100% de concentrado, um com proporção de 50:50 para o concentrado e o F/2 (GUILLARD, 1975) e um com 100% de F/2. O meio com 100% de concentrado foi o que obteve maior taxa de crescimento específico, 0,19d⁻¹, além de se apresentar eficiente na mitigação de nitrogênio, obtendo 93% de remoção, e quase que em totalidade os íons de flúor e fosfato, somado com a redução de outros íons presentes no meio (SHIRAZI et al., 2018).

Enfatiza-se que o meio concentrado possuía uma eletrocondutividade muito maior que o meio padrão F/2, evidenciando uma salinidade muito superior. Apesar disso, mostrou-se um meio eficiente para o cultivo da *D. tertiolecta*, o que é evidenciado pelos resultados superiores para os fatores avaliados.

Outra importante característica de utilização de microalgas é sua aplicação em biocombustíveis, sendo um campo vantajoso, visto que se trata de uma fonte renovável de grande potencial econômico e produtivo, desde que os métodos de cultivo sejam otimizados para que a viabilidade seja alcançada. Nesse contexto, a *Dunaliella* se mostra promissora na produção desses biocombustíveis.

El Aroussi et al. (2017) realizaram estudos com 57 cepas de microalgas marinhas, todas cultivadas em água do mar esterilizada com adição do meio F/2 e silicato, a 25°C e iluminação constante com intensidade de 150 μmol m⁻²s⁻¹ de luz durante um tempo de 14 dias.

As microalgas estudadas apresentaram entre 0,23 e 0,82 g/L de biomassa acumulada ao final do período de cultivo. Tendo como critério de escolha, o crescimento e o teor lipídico, elencaram a *Dunaliella* como uma das quatro mais promissoras, apresentando um teor de

lipídios de aproximadamente 50%, além de ser rica em TAG (triacylglycerol), composto utilizado para a produção de biocombustíveis (EL AROUSSI et al., 2017).

Em uma pesquisa prévia, EL AROUSSI et al. (2015) investigaram aumentar a produtividade de biomassa da *Dunaliella tertiolecta* com fertilizante, o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D). Neste estudo foi empregado o meio de cultivo F/2, 25°C e iluminação constante e intensidade de $150 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ de luz, o tempo de cultivo foi de 14 dias. Também foi investigado o aumento do estresse salino do meio através da adição de até 2 M de NaCl após o décimo dia de cultivo (considerando que o teor salino do meio F/2 é em torno de 0,5 M de NaCl).

Foi constatado que a utilização somente de estresse salino aumentou o conteúdo lipídico para 50%, o uso do 2,4-D sozinho resultou em 38 a 43% e a combinação do estresse salino com o uso do fertilizante 2,4-D obteve um conteúdo lipídico de 69,6%. Para comparação, o conteúdo lipídico do cultivo sem nenhum tratamento adicional apresentou um valor de 24% (EL AROUSSI et al., 2015). Dando margem assim, para a ideia já estudada por diversos autores, de que o aumento da salinidade do meio aumenta a produção de lipídios, aprimorando as possibilidades de uso da *D. tertiolecta* para produção de biocombustíveis.

Outro estudo envolvendo a utilização de fertilizantes para aumento na produtividade microalgal foi conduzido por KUMAR et al. (2018), que cultivou a *Dunaliella tertiolecta* com água do mar esterilizada juntamente com o meio F/2, a 23°C expostas a 18 horas diárias de luz diária com intensidade de $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ durante 9 dias. Empregado como fertilizante o composto NPK, a base de nitrogênio, fósforo e potássio, na proporção 10:26:26. Também foi utilizado uma alimentação contínua de 100% de CO₂, a fim de maximizar o sequestro de carbono.

Resultados obtidos mostraram que a combinação do fertilizante com a adição de CO₂ continuamente apresentou um aumento no sequestro de CO₂, na produção de biomassa e na acumulação lipídica, em valores de 25,36, 22,36 e 20,92%, respectivamente (KUMAR et al., 2018). Isso apresenta o fertilizante NPK como uma boa alternativa para aumentar a viabilidade de produção de biocombustíveis a partir da *D. tertiolecta*.

Seguindo este raciocínio da utilização de aditivos para potencializar a viabilidade do cultivo em larga escala da *D. tertiolecta*, Rizwan et al. (2017), se propuseram a observar os efeitos do uso de fontes de ferro de diferentes tipos no crescimento e na produção de lipídios e carboidratos. Foi utilizado o meio F/2, com iluminação contínua e intensidade de luz de 80 a $100 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ à 25°C, com 2% (v/v) de CO₂ durante 4 dias.

Foi relatado em seus resultados que, ao aumentar a concentração de ferro para 1.95 mg.L^{-1} (três vezes maior que a do meio), a taxa de crescimento e o conteúdo lipídico das microalgas também cresceu. A melhor concentração encontrada, apresentando valores de $0,275 \text{ g.L}^{-1}\text{dia}^{-1}$ (taxa de crescimento utilizando sulfato de amônia ferroso) e 35% (conteúdo lipídico máximo utilizando EDTA Férrico) (RIZWAN et al., 2017).

Corroborando com todas as pesquisas citadas, fica evidente que a *Dunaliella Tertiolecta* tem capacidade de um crescimento mais eficaz em meios alternativos, já que após a modificação ou adição de componentes no meio comumente usados para seu desenvolvimento (meio F/2 de Guillard), houve um aumento significativo tanto na quantidade de células, como no percentual de teor lipídico, somado a uma melhora no seu potencial biorremediador.

Chlorella vulgaris

Outra microalga que foi extensamente estudada e (vem apresentando) ou apresenta potenciais interessantes é a *Chlorella vulgaris*, como relata a pesquisa realizada por Subashini e Rajiv (2018), onde a *Chlorella vulgaris* foi cultivada em diferentes proporções do meio *Bold's Basal Medium* (BBM) e águas residuárias da indústria têxtil, com temperatura de $20\text{-}23^{\circ}\text{C}$, tendo iluminação diária de 12 horas.

A melhor proporção avaliada se mostrou sendo a com 15% de águas residuárias e 85% de BBM, onde ocorreu uma redução significativa em todos os parâmetros analisados, em destaque a demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos totais em suspensão que foram mitigados em mais de 75% no 28º dia de cultivo. Ademais, apresentou reduções relevantes de compostos AZO, que são compostos poluentes bastante presentes nos efluentes de indústria têxtil e em parâmetros como condutividade elétrica (46,19%), dureza (64,20%), cloro (60,00%), nitrogênio amoniacal (40,20%) e fosfato (39,14%) (SUBASHINI; RAJIV, 2018).

O trabalho denota a utilização dessa microalga como uma importante ferramenta no tratamento de efluentes industriais, ao passo que muitos desses efluentes possuem alta carga poluente. Podendo ser viável sua implementação, tendo em vista que, uma vez tratado é capaz de ser utilizado para outros usos menos exigentes.

El-Kassas e Mohamed (2014), também estudou a biorremediação de águas residuárias de indústria têxtil através da *C. vulgaris*. O cultivo foi conduzido usando diferentes proporções de efluente têxtil, suplementados com o meio sintético BBM (NICHOLS, 1973), à

temperatura de 25 °C e fotoperíodo de 12 horas por dia, conduzido por 15 dias. As concentrações de efluente variaram entre 5 e 30%. Também foi verificado se a adição de bicarbonato de sódio em diferentes concentrações aumentava o potencial remediativo do cultivo.

Os resultados apresentaram reduções representativas de DQO (69,90%) e corantes (75,68%) em concentrações medianas de efluentes (17,5%), além disso, observou-se uma boa produção de biomassa (El-KASSAS; MOHAMED, 2014). Corroborando com os resultados obtidos por Subashini e Rajiv (2018), apresentando uma elevada potencialidade na remediação de poluentes de indústrias têxteis, configurando como uma alternativa viável e eficiente no tratamento dessas águas residuárias.

No estudo de Chaudhary et al. (2020), o cultivo da *Chlorella vulgaris* foi realizado usando águas residuárias municipais como meio, à temperatura de 25°C, luminosidade diária de 14 horas e $80 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ de intensidade de luz, durante um período de 7 dias, com um cultivo aerado com ar ambiente e outro com concentrado de 5% de CO₂.

As condições mais favoráveis para a biorremediação dos compostos presentes nas águas residuárias foram com a concentração de CO₂ em 5%, atingindo remoções de 84,6% de DQO, 92,8% de ortofosfato e 88% de amônia (CHAUDHARY et al., 2020).

Assim como é percebido nessa pesquisa que muitas águas residuárias não seguem a proporção de cultivo ideal proposta por Redfield (1934) de 106:16:1 para carbono, nitrogênio e fósforo, respectivamente, o que apresenta muitas vezes, valores inferiores de carbono, acarretando numa ineficácia no cultivo. Uma das soluções para corrigir essa escassez de carbono é a adição de CO₂ em sua aeração, o que leva também a uma remediação do carbono no ambiente.

De forma semelhante, Zhou et al. (2014), buscaram ver a eficácia de quatro espécies microalgas, dentre elas a *C. vulgaris*, na biorremediação não só de componentes inorgânicos como também de nutrientes orgânicos, usando como meio de cultivo água residuária municipal, As condições de cultivo foram: temperatura de 25°C, período de iluminação diária de 12 horas com intensidade de $60 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, com duração de 7 dias.

Os resultados obtidos mostraram uma boa eficiência de remoção de fósforo e nitrogênio, com taxas de remoção de 82.2 e 92.3%, respectivamente. Além disso, dentre os 50 compostos presentes, mais de 50% (31) dos compostos foram removidos eficientemente, como também foi obtido uma redução significativa na atividade do hormônio estrogênio, um contaminante de difícil remoção em efluentes (ZHOU et al., 2014). Pode-se observar então, a

alta gama de possibilidades biorremediativas da *C. Vulgaris*, representando possibilidades de utilização nas mais variadas águas residuárias, com presença de diversos componentes.

Dada a importância da presença de nutrientes para o cultivo de microalgas, Ajala e Alexander (2019) avaliaram o potencial de biorremediação da *C. vulgaris* em águas residuárias, suplementadas de diferentes concentrações de sulfato, nitrato e fosfato. Os cultivos foram feitos em 14 dias, com aeração contínua a 2% de CO₂, temperatura ambiente local e ciclo de luz de 12 horas de iluminação. Os cultivos foram divididos em quatro casos com diferentes razões de nitrogênio e fósforo (N:P): Caso 1 (9:1), caso 2 (7:1), caso 3 (4:1) e caso 4 (3:1)

Analisando os resultados obtidos, percebe-se que o caso mais propício para remoção dos nutrientes em geral foi o caso 1, que se destaca por remover 93,1% de nitrato e 87,3% de fosfato (AJALA; ALEXANDER, 2019). O que demonstra que não obstante a proporção indicada por Redfield (1934) de 16:1 para nitrogênio e fósforo, respectivamente, outras proporções podem ser eficientes para melhorar a capacidade de biorremediação da microalga.

Outro tipo de água residuária que merece atenção no emprego de tecnologias sustentáveis para mitigação de seu potencial poluente é o rejeito de tratamento de águas residuárias por osmose reversa, também chamado de concentrado de osmose reversa (COR), o qual possui alta carga poluente.

Dessa forma, Chang et al. (2020) estudou a remediação de concentrado de osmose reversa (COR) associando tratamento por eletro oxidação com posterior biorremediação através da microalga *C. vulgaris*. O meio foi tratado inicialmente por eletro oxidação variando entre 0 a 48,75 mA.cm⁻². Após isso, as microalgas foram cultivadas neste meio nas condições de luminosidade diária constante a 25°C, com aeração contínua durante um período de 10 dias.

Os resultados mostraram que a associação dos tratamentos foi positiva na remoção dos nutrientes testados, sendo o valor mais eficaz de eletro oxidação de 48,75 mA.cm⁻², com redução significativa de DBO (66,3%), NH₄⁺ (100%), NO₃⁻ (96,4%) e PO₄³⁻ (100%), porém, tratando-se de custos associados o valor da eletro oxidação, o mais eficiente foi o de 3,25 mA.cm⁻², com valores de remoção de DBO (33,7%), NH₄⁺ (88,4%), NO₃⁻ (90,4%) e PO₄³⁻ (100%) (CHANG et al., 2020). Esses valores mostram que o uso associado de eletro oxidação e biorremediação através de microalgas é satisfatório, podendo ser uma importante ferramenta no tratamento de águas residuárias.

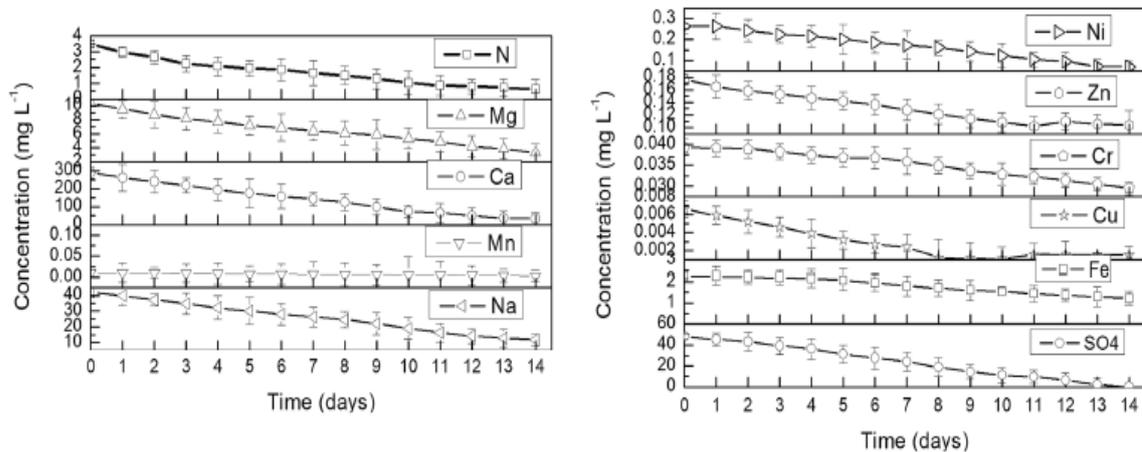
Uma distinta aplicação de microalgas na biorremediação foi estudada por Das e Deka (2019), que estudaram a capacidade remediativa das microalgas cultivadas em água de

formação de campos de petróleo (AFCP), que são águas contidas nos poros de rochas sedimentares presentes nesses campos. Tal água é rica em nutrientes propícios ao desenvolvimento microalgal, porém de alto teor poluente para descarte em sua forma inalterada.

Nesse estudo, a *Chlorella vulgaris* foi cultivada a uma temperatura de 25°C com iluminação diária de 14 horas, rotação de 110 rpm durante um período de 14 dias. Após as análises, foi visto que em comparação aos cultivos da microalga nas condições padrões, essa microalga teve a taxa de crescimento específico e produtividade de biomassa superior quando suplementada com a AFCP, ademais, não teve custos com a compra de nutrientes (DAS; DEKA, 2019). Esse dado mostra uma possibilidade de diminuição de despesas relacionadas a esse tipo de projeto, o tornando mais viável economicamente.

Ao decorrer do período de cultivo, as microalgas apresentaram uma redução expressiva em suas concentrações de nutrientes (N, Mg, Ca, Mn, Na, Ni, Zn, Cr, Cu, Fe e SO₄), o que é apresentado na Figura 2. Além disso, exprimiram uma taxa de degradação de hidrocarbonetos totais de petróleo de até 98,63% (DAS; DEKA, 2019). Um resultado bastante promissor para mitigação dos efeitos nocivos da exploração petrolífera.

Figura 2: Concentração de nutrientes ao decorrer do tempo



Fonte: Das e Deka (2019)

Da mesma forma que a *D. tertiolecta*, a microalga *C. vulgaris* vem ganhando espaço para produção de biocombustíveis. Pesquisas procuram melhorar a produtividade lipídica, visto que a *C. vulgaris* é uma microalga cosmopolita de água doce de fácil crescimento e adaptação nos mais variados ambientes. Contudo, é necessário criar formas onde esse cultivo seja viável para produção de biocombustível em larga escala.

Na pesquisa já citada anteriormente de Chang et al. (2020), ao utilizar $3,25 \text{ mA.cm}^{-2}$ como densidade de corrente, a *C. vulgaris* obteve um teor lipídico de 38,7%, com uma produção lipídica de $491,5 \text{ mg.L}^{-1}$ e uma concentração de biomassa de $1,27 \text{ g.L}^{-1}$. Nessas condições, o rendimento de energia lipídica das microalgas alcançou $17,9 \text{ kJ.L}^{-1}$, quase cobrindo o total de energia consumida apesar do processo de esterilização da autoclave ($22,2 \text{ kJ.L}^{-1}$).

Em estudo realizado por Choi et al. (2019), foram realizados experimentos com várias microalgas a fim de avaliar seus potenciais lipídicos. A *C. vulgaris* foi cultivada usando o meio trifosfato (TP) com o pH de 7,3 e temperatura de 23°C , condições propícias para a criação de espécies de água doce (CHOI et al., 2016).

Neste trabalho, a *C. vulgaris* apresentou um crescimento de biomassa superior a 3g.L^{-1} em 8 dias de cultivo, apresentando uma produtividade superior à maioria das dez microalgas estudadas, e dessas ela teve o segundo melhor teor lipídico, cerca de 41%, perdendo apenas para *H. pluvialis*, por uma diferença pequena. Além disso, apresentou um alto poder calorífico, com valor de $8,529 \text{ kJ.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$, sendo o segundo melhor resultado entre as microalgas estudadas (CHOI et al., 2019).

As análises fornecem evidências quantitativas para justificar como a utilização de combustível sólido microalgal supera duplamente o sistema convencional de combustível direcionado a lipídios e a extensa biomassa lenhosa explorada (CHOI et al., 2019). Isso mostra que nessas condições a *C. vulgaris* consegue ter um teor de lipídeos oportuno para fins de produção de combustível.

Outros fatores podem ser considerados para aperfeiçoamento da produção lipídica, visando à produção de biocombustíveis. Sánchez-Saavedra et al. (2020) em seu estudo avaliou a influência de diferentes tipos de luz na produção de lipídios pela *C. vulgaris*. A microalga foi cultivada sob condições de iluminação constante, intensidade de luz igual a $50 \mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, sem controle de pH e com temperatura de aproximadamente 21°C .

Neste estudo foram testadas as luzes azul, verde, amarela e branca. Após a apuração dos resultados, foi visto que a luz mais eficaz para o aumento do teor lipídico da microalga foi a azul, sendo capaz de atingir um teor de 18,74%, enquanto que a luz branca, que era a referência para a luz do dia, atingiu 14,79% (SÁNCHEZ-SAAVEDRA et al., 2020). Os resultados evidenciaram um acréscimo de aproximados 21,08% de teor lipídico, algo aprazível em relação à produção de biocombustível, tendo em vista que a junção a outras condições poderiam acrescer esse teor. Vale realçar que no cultivo não foram acrescentados

fluxos de ar e recursos de carbono, que poderiam aumentar ainda mais ainda o rendimento da microalga.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude do que foi explanado neste trabalho, é válido afirmar que as microalgas *D. tertiolecta* e *C. vulgaris* apresentaram resultados satisfatoriamente expressivos, haja vista a quantidade de teor lipídico que pode ser acrescido com diversificados modos de cultivo, aos quais podem ser feitas pesquisas para unir alguns desses métodos e analisar até quanto esse teor poderia ser acrescentado, ampliando as suas potencialidades para produção de biocombustíveis e assim verificando se o processo ainda continuaria tendo um baixo custo.

Notou-se que a *Dunaliella tertiolecta* se deu muito bem em meios cultivados com altos teores de sal, consoante ao fato da microalga ser do tipo marinha. Também ficou evidente que a *Chlorella vulgaris* apresenta boa adaptabilidade a diversos meios, conseguindo um teor lipídico satisfatório em praticamente todos citados, os quais são dignos de futuras investigações.

Conclui-se então, que a *D. tertiolecta* e a *C. vulgaris* têm aprimorado a capacidade de serem usadas com os objetivos simultâneos de biorremediar e produzir biocombustíveis de forma sustentável e que posteriores pesquisas utilizando as referências citadas podem aperfeiçoar os resultados.

REFERÊNCIAS

AJALA, S. O.; ALEXANDER, M. L. Assessment of *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Oocystis minuta* for removal of sulfate, nitrate, and phosphate in wastewater. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, 2020. DOI: 10.1007/s40095-019-00333-0

AKBARZADEH, N.; SHARIATI, M. Aluminum remediation from medium by *Dunaliella*. **Ecological Engineering** v. 67, p. 76-79, 2014. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.014

ANDREOTTI V. et al. Bioremediation of aquaculture wastewater from *Mugil cephalus* (Linnaeus, 1758) with different microalgae species, **Chemistry and Ecology** v.37, p.750-761, 2017. DOI:10.1080/02757540.2017.1378351

BENHIMA, R. et al. Nitrate Reductase Inhibition Induces Lipid Enhancement of *Dunaliella Tertiolecta* for Biodiesel Production. **The Scientific World Journal**, 2018. DOI: 10.1155/2018/6834725

CANCELA, A. et al. Microalgae cultivation and harvesting for bioenergy production. **Bioresource Technology Reports** v. 08, 2019. DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100333

CHANG, H. et al. Highly efficient reverse osmosis concentrate remediation by microalgae for biolipid production assisted with electrooxidation. **Water Research** v.174, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115642

CHAUDHARY, R. et al. Kinetic study of nutrients removal from municipal wastewater by *Chlorella vulgaris* in photobioreactor supplied with CO₂-enriched air. **Environmental Technology** v.41, n.05, p.617-626, 2020. DOI: 10.1080/09593330.2018.1508250

CHOI, H.I. et al. Performance and potential appraisal of various microalgae as direct combustion fuel. **Bioresource Technology** v.273, p.341-349, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.030

CHOI, H.I. et al.. Quantitative analysis of the chemotaxis of a green alga, *Chlamydomonas reinhardtii*, to bicarbonate using diffusion-based microfluidic device. **Biomicrofluidics** v.10, 2016. DOI: 10.1063/1.4942756

DAS, B. e DEKA, S. A cost-effective and environmentally sustainable process for phycoremediation of oil field formation water for its safe disposal and reuse. **Scientific Reports** v.9, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-51806-5

EL ARROUSSI, H. et al. Improvement of the potential of *Dunaliella tertiolecta* as a source of biodiesel by auxin treatment coupled to salt stress. **Renewable Energy** v.77, p.15-19, 2015. DOI: 10.1016/j.renene.2014.12.010

EL ARROUSSI, H. et al. Screening of marine microalgae strains from Moroccan coasts for biodiesel production. **Renewable Energy** v. 113, p.1515-1522, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.035

EL-KASSAS, H. Y., MOHAMED, L. A. Bioremediation of the textile waste effluent by *Chlorella vulgaris*. **Egyptian Journal of Aquatic Research** v. 40, p.301-308, 2014. DOI: 10.1016/j.ejar.2014.08.003

FU, J. et al. Photo-bioreactor design for microalgae: a review from the aspect of CO₂ transfer and conversion. **Bioresource Technology** v.292, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121947

GIOSTRI, A. et al. Microalgae cofiring in coal power plants: innovative system layout and energy analysis. **Renewable Energy**. v.95, p. 449-464, 2016 DOI: 10.1016/j.renene.2016.04.033

GUILLARD, R. R. L. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In: SMITH, W. L.; CHANLEY, M. H. (Eds.). **Culture of marine invertebrate animals**. New York: Plenum p. 29-60, 1975.

GUILLARD, R.R.L.; HARGRAVES, P.E. *Stichochrysis immobilis* is a diatom, not a chrysophyte. **Phycologia** v.32, p.234-236, 1993.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008. Rio de Janeiro: **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**; 2011.

KUMAR, A. et al. Optimal cultivation towards enhanced algae-biomass and lipid production using *Dunaliella tertiolecta* for biofuel application and potential CO₂ biofixation: Effect of nitrogen deficient fertilizer, light intensity, salinity and carbon supply strategy. **Energy** v.148, p.1069-1086, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.042

MATA, T. M. et al. Microalgae for biodiesel production and other applications: **A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews** v.14, p.217-232, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.020

NICHOLS, H.W. Growth media freshwater. In: Stein, J. (Ed.), Handbook of Phycological Methods: Culture Methods and Growth Measurements. **Cambridge University Press**, p. 7–24, 1973.

PAIVA, R. F. DA P. DE S.; DE SOUZA, M. F. DA P. Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. **Cadernos de Saúde Pública** v. 34, n. 1, 2018. Fundação Oswaldo Cruz. DOI: 10.1590/0102-311x00017316

PHONG VO, H. N. et al. Microalgae for saline wastewater treatment: a critical review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 2019. DOI: 10.1080/10643389.2019.1656510

REDFIELD AC. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. **James Johnstone Memorial Volume** p. 176–92, 1934

RIZWAN M. et al. Effects of Iron Sources on the Growth and Lipid/Carbohydrate Production of Marine Microalga *Dunaliella tertiolecta*. **Biotechnology and Bioprocess Engineering** v.22, p.68-75, 2017. DOI: 10.1007/s12257-016-0628-0

SÁNCHEZ-SAAVEDRA, M. D. P. et al. The Use of Light Spectra to Improve the Growth and Lipid Content of *Chlorella vulgaris* for Biofuels Production. **BioEnergy Research**, 2020. DOI: 10.1007/s12155-019-10070-1

SHARIATI, M.; LILLEY, R.McC. Loss of intracellular glycerol from *Dunaliella* by electroporation at constant osmotic pressure: subsequent restoration of glycerol content and associated volume changes. **Plant Cell Environmental** v.17, p.1295–1304, 1994. DOI:10.1111/j.1365-3040.1994.tb00531.x

SHIRAZI, S. A. et al. Simultaneous biomass production and water desalination concentrate treatment by using microalgae. **Desalination and water treatment** v.135, p.101-107, 2018. DOI: 10.5004/dwt.2018.23163

SIALVE, B. et al. Integrating microalgae production with anaerobic digestion: a biorefinery approach. **Biofpr** v.08, p.516-529, 2014. DOI: 10.1002/bbb.1469

SUBASHINI, P.S. e RAJIV, P. An Investigation of Textile Wastewater Treatment using *Chlorella vulgaris*. **Oriental Journal Of Chemistry** v.34, n.05, p.2517-2524, 2018. DOI: 10.13005/ojc/340538

WU, K-C. et al. Capability of microalgae for local saline sewage treatment towards biodiesel production. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** v.82, 2017. DOI:10.1088/1755-1315/82/1/012008

ZHOU, G. et al. Simultaneous removal of inorganic and organic compounds in wastewater by freshwater green microalgae. **Environmental Science: Processes and Impacts** v. 16, 2014. DOI: 10.1039/c4em00094c

ZHU, C. et al. A recycling culture of *Neochloris oleoabundans* in a bicarbonate-based integrated carbon capture and algae production system with harvesting by auto-flocculation. **Biotechnology for Biofuels** v. 11, n.204, 2018. DOI: 10.1186/s13068-018-1197-6