

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS
ALIMENTOS

Patricia Arrojo da Silva

**INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS E TIPOLOGIA EM
FOTOBIORREACTORES MICROALGAIS**

Santa Maria, RS
2022

Patricia Arrojo da Silva

**INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS E TIPOLOGIA EM
FOTOBIORREATORES MICROALGAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia dos Alimentos**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Jacob-Lopes

Santa Maria, RS
2022

da Silva, Patricia
Influência dos elementos climáticos e tipologia em
fotobiorreatores microalgais / Patricia da Silva.- 2022.
51 p.; 30 cm

Orientador: Eduardo Jacob-Lopes
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, RS, 2022

1. Algas 2. Posição geoespacial 3. Elementos
climáticos 4. Tipologia climática I. Jacob-Lopes,
Eduardo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

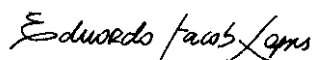
Declaro, PATRICIA DA SILVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Patricia Arrojo da Silva

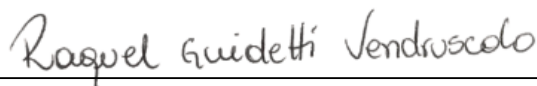
**INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS E TIPOLOGIA EM
FOTOBIORREACTORES MICROALGAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Alimentos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia dos Alimentos**.

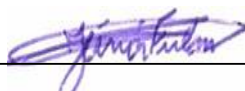
Aprovado em 1 de abril de 2022:



Eduardo Jacob-Lopes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Raquel Guidetti Vendruscolo, Dra. (UFVJM)



Valcenir Júnior Mendes Furlan, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Eloir Ferreira da Silva e Vera Lúcia Arrojo da Silva, por serem minhas raízes, por sempre me incentivarem e respeitarem minhas decisões ao longo da minha trajetória acadêmica, pelo suporte financeiro durante esses anos e por todo amor e carinho.

Às minhas irmãs Pricila Arrojo da Silva e Paola Arrojo da Silva, por sempre estarem ao meu lado me apoiando, por escutarem meus desabafos e angústias, sem julgamentos, e por sempre acreditarem no meu potencial.

Ao meu companheiro Rafael do Amaral Bona, por todos os dias estar ao meu lado, construindo nossos sonhos juntos, me apoiando e incentivando incondicionalmente, sempre mostrando o quanto sou capaz de alcançar meus objetivos, por ser meu ombro amigo muitas vezes, por me acalmar nos dias difíceis, por respeitar minhas decisões e também pelo suporte financeiro.

Aos meus sobrinhos Léo da Silva Hilbig, Júlia da Silva Hilbig e meu cunhado Daniel Scherer Hilbig.

Às minhas amigas de longa data Caroline Giuliani e Verlaine Selli que muitas vezes me acolheram com palavras de incentivo, ou apenas me escutaram desabafar minhas dificuldades.

Às minhas colegas e amigas de laboratório Paola Lasta e Patricia Caetano por sempre estamos juntas uma ajudando e apoiando a outra, sem vocês com certeza essa trajetória iria ser bem mais difícil.

Aos doutores e doutorandos Aline Meirelles dos Santos, Alberto Meirelles dos Santos, Álisson Oliveira, Karem Viera, Pricila Nass, Rosângela Rodrigues dias, Mariany Costa Deprá e Rafaela Basso Sartori, por sempre estarem dispostas a sanar qualquer dúvida e pela ajuda no decorrer dessa trajetória.

Aos demais colegas e amigos no laboratório NTA, Sandra Kunde Schlesner, Ana Carolina Seibt e Mariana Basso Pinto, pelo companheirismo, pela ajuda, pelas conversas, e momentos de distração.

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Eduardo Jacob Lopes, por ter me fornecido desde o ano de 2017 a oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa “Bioprocesses Intensification group from microalgae”, serão ensinamentos que levarei por toda minha vida.

À Universidade Federal de Santa Maria, que desde 2013 vem me proporcionando uma formação de qualidade, primeiro no ensino técnico, seguido da graduação, e agora por

fim na pós-graduação, por todo o apoio estudantil fornecido pela instituição.

Aos membros da banca Dra. Raquel Guidetti Vendruscolo e Dr. Valcenir Júnior Mendes Furlan, pelas contribuições.

À CNPq, pela bolsa de mestrado concedida. E demais órgãos, fomentadores.

A todos, meu muito obrigada.

*Existem duas heranças duradouras
que podemos deixar para nossos
filhos. A primeira são raízes. A
segunda são asas.*

(Hodding Carter Jr.)

RESUMO

INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS E TIPOLOGIA EM FOTOBIORREATORES MICROALGAIS

AUTORA: Patricia Arrojo da Silva

ORIENTADOR: Eduardo Jacob-Lopes

Os sistemas de cultivo de microalgas em escala comercial são realizados ao ar livre, por isso é extremamente necessário destacar o papel do clima local no desempenho dos processos biotecnológicos das microalgas. Assim, a identificação de locais com climas adequados para a implantação em larga escala de processos baseados em microalgas tornou-se um ponto quente, pois está associada ao desenvolvimento de técnicas de processo e questões econômicas. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi simular o efeito da posição geográfica e do clima local sobre o desempenho de fotobiorreatores na zona de clima subtropical (25 a 35° N e S) e na zona de latitude média (35 a 55° N e S) do mundo. O estudo se concentrou-se na simulação de elementos climáticos (duração do dia, irradiância solar e temperatura) e estações do ano de 11 tipos de clima distribuídos em 15 localizações geográficas. Posteriormente, foi avaliado o comportamento de *Scenedesmus obliquus* CPCC05 sobre a produção de biomassa, lipídios e ácidos graxos. Os resultados mostraram que a zona subtropical apresentou as melhores condições de cultivo, onde o clima desértico quente (BWh) apresentou as melhores condições, em termos de biomassa e produção de lipídios, em um panorama anual. Os maiores rendimentos médios anuais de biomassa ($0,210 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e médias anuais de lipídios ($0,037 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) foram registrados no município de Hermosillo-MEX. Dessa forma, é possível obter alta produtividade de biomassa e de lipídios ao longo de todo ano e pode ser realizada a colheita simultaneamente, sem a necessidade de um período de entressafra. Considerando que apenas instalações de cultivo altamente produtivas são potencialmente viáveis, os dados obtidos são de extrema relevância para a projeção de instalações de processamento à base de microalgas em locais específicos.

Palavras-chave: Algas. Posição geoespacial. Elementos climáticos. Tipologia climática.

ABSTRACT

INFLUENCE OF CLIMATE ELEMENTS AND TYPOLOGY ON MICROALGAL PHOTOBIOREACTORS

AUTORA: Patricia Arrojo da Silva

ORIENTADOR: Eduardo Jacob-Lopes

Commercial scale microalgae cultivation systems are carried out outdoors, so it is extremely necessary to highlight the role of the local climate in the performance of microalgae biotechnological processes. Thus, the identification of locations with suitable climates for the large-scale implementation of microalgae-based processes has become a hot spot, as it is associated with the development of process techniques and economic issues. In this sense, the objective of the present work was to simulate the effect of geographic position and local climate on the performance of photobioreactors in the subtropical climate zone (25 to 35° N and S) and in the mid-latitude zone (35 to 55 °N and S) of the world. The study focused on simulation climatic elements (day length, solar irradiance and temperature) and seasons of 11 climate types distributed in 15 geographic locations. Subsequently, the behavior of *Scenedesmus obliquus* CPCC05 on the production of biomass, lipids and fatty acids was evaluated. The results showed that the subtropical zone presented the best cultivation conditions, where the hot desert climate (BWh) presented the best conditions, in terms of biomass and lipid production, in an annual scenario. The highest average annual biomass yields ($0.210 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) and annual averages of lipids ($0.037 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) were recorded in the municipality of Hermosillo-MÉX. In this way, productivity keeps growing throughout the year and so they can be harvested simultaneously, without the need for an inter-harvest period. Therefore, considering that only highly productive cultivation facilities are potentially viable, it is essential to design specific sites for the implementation of microalgae-based processing facilities.

Keywords: Algae. Geospatial position. Climatic elements. Climate typology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa-múndi da classificação climática de Köppen-Geiger com posições geográficas da pesquisa.....	25
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação climática de Köppen-Geiger e condições experimentais para cada posição geográfica.....	26
Tabela 2 - Parâmetros cinéticos para <i>Scenedesmus obliquus</i> CPCC05 em diferentes localizações geográficas da zona climática subtropical e de latitudes médias	31
Tabela 3 - Teor lipídico e produtividade lipídica de <i>Scenedesmus obliquus</i> CPCC05	37
Tabela 4 - Perfil de ácidos graxos de <i>Scenedesmus obliquus</i> CPCC05 sob diferentes condições climáticas.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 MICROALGAS	15
3.2 METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO	16
3.3 FOTOBIOREACTORES	17
3.4 INFLUÊNCIA DO CLIMA NO CULTIVO DE MICROALGAS.....	20
3.5 COMPOSIÇÃO E PORTFÓLIO DE APLICAÇÕES MICROALGAIS	21
4 MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1 MICRORGANISMO E CONDIÇÕES DE CULTURA.....	22
4.2 PROJETO DE FOTOBIOREATOR	23
4.3 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	23
4.4 SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS	24
4.5 PARÂMETROS CINÉTICOS	29
4.6 ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA DA COMPOSIÇÃO DE MICROALGAS	29
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 EFEITOS DO CLIMA NO DESEMPENHO CINÉTICO DO SISTEMA	30
5.2 EFEITOS DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA E DA ESTAÇÃO NA PRODUÇÃO DE LÍPIDIOS E ÁCIDOS GRAXO	36
6 CONCLUSÃO GERAL	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as crescentes demandas por biomassa como matéria-prima para alimentos, rações, materiais à base de petróleo e produção de energia são indispensáveis, devido ao aumento da população mundial e à necessidade de alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis (CHEREGI et al., 2021). Pesquisas indicam que a população mundial deverá atingir aproximadamente 9,7 bilhões em 2050, com isso a demanda por alimentos deverá se expandir de 60 a 100% (YARNOLD et al., 2019).

Notoriamente, nesta nova era de busca global por fontes alternativas, as microalgas estão emergindo como uma matéria-prima de vital importância devido à sua capacidade de fornecer bens e serviços valiosos em uma variedade de produtos de valor agregado, como biocombustíveis, produtos químicos de base biológica, biomateriais, e substâncias bioativas (WANG et al., 2021; ABU-GHOSH et al., 2021). No entanto, a indústria de microalgas está atualmente destinada para o desenvolvimento de produtos especiais, como pigmentos proteicos unicelulares (biomassa seca total), β -caroteno, astaxantina, ficocianina e ácidos graxos poli-insaturados como o ácido eicosapentaenoico (EPA) e o ácido docosahexaenoico (DHA) (JACOB-LOPES et al., 2019). Vale ressaltar, que o mercado de produtos à base de microalgas em 2021 foi avaliado em USD 1.654.23 milhões e as projeções futuras indicam que chegará a USD 2.811.10 milhões em 2028, portanto, espera-se que entre 2021 e 2028 haja um aumento potencial de aproximadamente 7, 9 % CAGR (GLOBENEWSWIRE, 2021).

Inegavelmente, a indústria de microalgas está ganhando popularidade em todo o mundo, por isso pode ser amplamente aplicada por meio da incorporação em produtos comerciais para diferentes setores no futuro (TANG et al., 2020). Diante disso, o sucesso dos processos à base de microalgas é altamente dependente da produtividade da biomassa, uma vez que considera a biomassa máxima e o tempo necessário para atingir produção assertiva (JACOB-LOPES et al., 2020; NWOBA et al., 2019).

Apesar dessas vantagens, o baixo crescimento da produtividade e os custosos processos *downstream* são os gargalos que precisam ser resolvidos (TANG et al., 2020). O cultivo externo é considerado a opção mais sustentável, devido à quantidade mínima de energia e materiais usados para produzir biomassa microalgal (ACIÉN et al., 2016). No entanto, seu funcionamento é dificultado tanto pela complexidade dos mecanismos biológicos envolvidos quanto pelas condições climáticas variáveis que afetam o sistema (DE-LUCA et al., 2018). Deve-se levar em consideração que o modo fotoautotrófico visa o cultivo de

microalgas em cultivo externo, mas sua aplicação também é limitante devido à dependência luminosa. Substancialmente, a aplicação de luz artificial em cultivo fotoautotrófico externo em grande escala os torna caros, por isso é de fundamental importância mapear o local adequado para implementar e otimizar processos em grande escala baseados em microalgas. Isso ocorre porque a irradiação solar varia de acordo com a região geográfica, a estação do ano e as condições climáticas (NITSOS et al., 2020).

Os principais elementos climáticos locais para a biotecnologia de microrganismos fotoautotróficos são baseados na luz solar e na temperatura e, portanto, as taxas de produção de biomassa e metabólitos geralmente permanecem sujeitas à variação diária e sazonal desses elementos, uma vez que eles não podem ser controlados sob condições externas (ESTEVEZ et al., 2020; YUAN et al., 2020; PARSY et al., 2021). Em suma, a seleção da localização geográfica é necessária para implementar instalações de grande escala que se tornem potencialmente viáveis, uma vez que apenas instalações de cultivo altamente produtivas se aproximam da viabilidade comercial (CORONEL et al., 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Nesse sentido, para impulsionar este direcionamento de pesquisa, o trabalho teve como objetivo simular o efeito da posição geográfica e do clima local sobre o desempenho de fotobiorreatores na zona de clima subtropical (25 a 35° N e S) e zona climática de latitudes médias (35 a 55° N e S) no mundo.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a simulação a partir de diferentes posições geográficas da zona subtropical e zona de latitude médias, levando em consideração os elementos climáticos (intensidade solar, temperatura e fotoperíodo) e a tipologia climática.

- Calcular os parâmetros cinéticos da produção de biomassa da microalga *Scenedesmus obliquus* (CPCC05) de acordo com os elementos climáticos e tipologia climática nas diferentes posições geográficas.

- Avaliar a síntese de lipídios da biomassa microalgal durante a simulação de diferentes

posições geográficas de acordo com os elementos climáticos e tipologia climática nas diferentes posições geográficas.

- Analisar a composição de ácidos graxos da biomassa microalgal de acordo com os elementos climáticos e tipologia climática nas diferentes posições geográficas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MICROALGAS

O termo microalgas é isento de valor taxonômico, pois abrange microrganismos fotossintéticos diversos, exibem uma estrutura vegetativa denominado talo, cuja diferenciação celular é caracteristicamente pequena ou nula. Além disso, possuem a capacidade de converter energia luminosa e fontes de carbono inorgânico em biomassa, liberando O₂ na atmosfera (LOURENÇO, 2006; MOLINUEVO-SALCES et al., 2019).

As microalgas são classificadas em algas verdes (*Chlorophyceae*), diatomáceas (*Bacillariophyceae*), marrom-dourado (*Crysophyceae*) e cianobactérias (*Cyanophyceae*) e têm cerca de 25.000 espécies disponíveis (BALAT, 2011). Entre as classes mais abundantes estão as diatomáceas, algas verdes e algas douradas. Em relação à exploração e uso biotecnológico, algas verdes, cianobactérias e diatomáceas são as mais significativas (DURÁN et al., 2018; BOROWITZKA., 2018). De acordo com Jacob-Lopes et al. (2018), estes microrganismos também estão sendo tradicionalmente classificados conforme os tipos de pigmentos, natureza química dos produtos de reserva e estrutura celular básica.

As microalgas também podem ser classificadas quanto aquisição de carbono. Os microrganismos que necessitam de fontes de luz para gerar energia são classificados como culturas autotróficas. Por outro lado, organismos heterotróficos usam carbono orgânico como fonte de energia. Consequentemente, o uso simultâneo de cultivos autotróficos e heterotróficos é classificado como cultivo mixotrófico, contribuindo assim para um maior rendimento de biomassa de microalgas, devido ao fato de que as microalgas cultivadas obterão suprimentos de carbono inorgânico e alguma fonte de carbono orgânico ao mesmo tempo (PATEL et al., 2019). Por fim, o cultivo fotoheterotrófico utiliza a luz ao empregar compostos orgânicos como fonte de carbono, ou seja, a principal distinção entre cultivo mixotrófico e fotoheterotrófico é que este último não consegue absorver e metabolizar CO₂ (CHEW et al., 2018).

Pertencente à classe *Chlorophyceae*, a microalga *Scenedesmus obliquus* apresenta-se como uma candidata promissora por proporcionar altas taxas de produtividade de biomassa (CHU et al., 2014; ABOMOHRA et al., 2016). Em termos morfológicos, apresenta células cilíndricas com 5-10 µm de diâmetro, unicelulares e forma colônias com quatro células. Quanto aos atributos biotecnológicos, aparece como um recurso potencial, devido à exploração de biomassa, teor de lipídios e pigmentos fotossintéticos relevantes (BECKER, 2007; KIM et al., 2016). Além disso, por seu habitat ser de água doce, é amplamente utilizado na biorremediação de poluentes ambientais (QIAO-HUI et al., 2015).

Notoriamente, pesquisas relatam que esta espécie apresenta grande capacidade para biofixação de carbono, assim viabilizando o cultivo em elevadas concentrações de dióxido de carbono (HO et al., 2013; CHEAH et al., 2015).

3.2 METABOLISMO FOTOSSINTÉTICO

Nos últimos anos, a captura biológica de CO₂ com base em microalgas é considerada um método promissor para mitigar as emissões de CO₂, devido ao seu papel importante na determinação das taxas de captura de CO₂ e níveis de produção de biomassa (CHENG et al., 2019). Isso pode ser atribuído à sua versatilidade metabólica, uma vez que as microalgas são capazes de assimilar carbono inorgânico via fotossíntese, após uma sequência de reações de carboxilação, redução e regeneração.

O mecanismo da fotossíntese ocorre nos cloroplasto das células e apresenta-se através de duas etapas: a fotoquímica que se dá na membrana tilacoide e a de fixação de carbono que acontece no estroma (WILLIANS E LAUREN, 2010). As reações luminosas ocorrem na etapa fotoquímica, na qual acontece a formação de compostos de elevada energia, como ATP (adenosina trifosfato) e NADPH (nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato). Nesta fase, a energia luminosa é absorvida pelas estruturas altamente organizadas dos pigmentos fotossintéticos e transportadores de elétrons, chamados fotossistemas. Os fotossistemas são constituídos pelo complexo do centro de reação e pelo complexo antena. Fazem parte do complexo antena os pigmentos acessórios: clorofilas *b*, *c* e *d*, carotenoides e ficobiliproteínas. Estes têm como principal finalidade absorver os fótons e transferir a energia para o complexo do centro de reação. No qual, então as moléculas de clorofila *a* que são excitadas e seus elétrons são transferidos para uma molécula carreadora de elétrons (ZHAO E SU, 2014).

Os elétrons então fluem através de uma série de transportadores ligados à membrana, incluindo citocromos, quinonas e proteínas ferro-enxofre. Simultaneamente, prótons são

bombeados pela membrana tilacóide, a fim de gerar um potencial eletroquímico. Parte da energia liberada é incorporada durante este transporte de elétrons em ATP no processo de fosforilação. A última fonte de elétrons para a fotossíntese é a H₂O, o qual cede no processo de fotólise (reação de Hill), átomos de hidrogênio, elétrons e libera O₂, produto da fotossíntese das microalgas e das plantas verdes (FAY, 1983).

Na fase independente de luz, conhecida como fixação de carbono ou ciclo de Calvin, acontece a síntese de açúcares simples. O ciclo começa com a reação da ribulose 1,5-bisfosfato (Ru5BP), que é catalisada pela enzima ribulose 1,5-difosfato carboxilase/oxigenase (rubisco), com o CO₂. O produto da reação é quebrado em duas moléculas de três carbonos, 3-fosfoglicerato (PGA). Na presença de ATP e NADPH, o PGA é reduzido em gliceraldeído 3-fosfato (G3P). A maior parte (5 de 6 moléculas) do G3P produzido é utilizado para regenerar Ru5BP, de modo que o ciclo possa ser fechado. Uma das seis moléculas de Ru5BP não é reciclada e, então se condensa para formar açúcares fosforados intermediários e, posteriormente glicose (WILLIAMS E LAUREN, 2010).

Portanto, as microalgas podem fixar fontes de carbono inorgânico variáveis, incluindo CO₂ da atmosfera, gases de exaustão industriais e construtores de carbono solúvel, de modo que o CO₂ é o principal recurso para a fotossíntese e absorção de carbono das microalgas até 36-65 % da matéria seca das microalgas biomassa (SYDNEY et al., 2010; CHAE et al., 2006). No entanto, existem parâmetros que não são tão bem elucidados que interferem nesse desempenho, como temperatura, intensidade luminosa, concentração de carbono, taxa de aeração, pH e tempo, os quais são considerados os mais importantes durante a fase de crescimento da biomassa das algas e posterior fixação de CO₂. Como resultado, nas transformações do CO₂ são obtidos carboidratos, lipídicos e proteínas, que posteriormente podem ser convertidos/biotransformados em diversos biocombustíveis renováveis.

3.3 FOTOBIORREATORES

Os fotobiorreatores são o centro da engenharia de bioprocessos de microalgas. Portanto, a comunidade acadêmica tem despertado interesse no projeto e operação de fotobiorreatores proporcionando assim o rastreamento biotecnológico industrial. Essas configurações em operação atual são extrapolações de reatores químicos convencionais (JACOB-LOPES et al., 2016). Isso porque apresentam melhor controle sobre os parâmetros de cultivo e necessitam ser desenvolvidos para uma potencial produção, custo-benefício e

baixa manutenção (REHMAN et al., 2022).

Para a produção em larga escala de biomassa de microalgas, existem diferentes tecnologias, como os sistemas abertos e os sistemas fechados. Os sistemas abertos são simples e de baixo custo, por outro lado os sistemas fechados fornecem um potencial elevado para maior rendimento de biomassa, devido ao melhor controle fornecido dos parâmetros operacionais (AHMAD et al., 2021).

Os parâmetros operacionais de maior importância em processos fototróficos em microalgas incluem: elevada eficiência de utilização da energia luminosa e nutrientes (carbono, nitrogênio, fósforo etc.), adequado sistema de mistura, facilidade de controle das condições de cultivo (pH, temperatura, quantidade de CO₂, agitação, redução do estresse hidrodinâmico das células e facilidade para o aumento de escala) e o tipo de sistema usado para o cultivo (MUÑOZ E GUIEYSSE, 2006; PRUVOST et al., 2016; AHMAD et al., 2021; ACIÉN et al., 2017).

O fornecimento de luminosidade é um dos fatores mais importantes para o crescimento e rendimento do produto das células fotossintéticas (WANG et al., 2014). Conseqüentemente, varia em termos de quantidade, intensidade, qualidade e tipo de energia luminosa. Assim, é evidente que a fotossíntese depende deste parâmetro do processo, características modificam substancialmente o projeto do fotobiorreator para culturas de microalgas (DEPRÁ et al., 2021). Além da intensidade luminosa, o fotoperíodo (relação entre a duração dos ciclos de luz e escuro) é um ponto chave a ser considerado no projeto de fotobiorreatores, devido às oscilações de intensidade luminosa sofrida ao longo do dia, as quais resultam em grandes alterações negativas na eficiência fotossintética dos sistemas (JACOB-LOPES et al., 2009).

No que se refere ao suprimento de nutrientes, os principais componentes da biomassa de microalgas são: carbono (30-50% de peso seco (p.p.), oxigênio (30-50% p.p.), hidrogênio (3-7% p.p.), nitrogênio (4-9% d.p.), fósforo (1-3% d.wt.) e poucas quantidades de outros elementos, incluindo enxofre, potássio, magnésio, cálcio e assim por diante. Assim, o meio de cultura deve conter esses nutrientes para permitir o máximo desempenho das culturas. Existe uma variedade de proposta como meio de cultura, entre essas mais utilizadas são f/2, Algal, BBM, BG11, Zarrouk e Mann & Myers (ANDERSEN et al., 2005). A demanda de qualquer cultura de microalgas pode ser definida conhecendo a produtividade da biomassa e a composição da biomassa. Entretanto o fornecimento ideal que essa quantidade de nutrientes provocará na operação do processo sob condições limitantes de nutrientes, o que pode levar a

uma diminuição da produtividade celular. Normalmente é aceito que a operação do processo sob condições de excesso de nutrientes permite maximizar a produtividade das culturas. Os nutrientes em excesso geralmente são liberados e perdidos do sistema se o meio de cultivo não for reticulado, assim devem ser definidos de acordo com critérios econômicos e de sustentabilidade (ACIÉN et al., 2017).

Com relação às condições de cultura, as principais variáveis que afetam o crescimento de microalgas são temperatura e pH. A temperatura é importante para o cultivo de microalgas tanto em sistemas abertos ou fechados. Conseqüentemente, cada espécie de microalga apresenta uma faixa de crescimento ideal, conforme a tolerância à temperatura, as microalgas podem ser classificadas em microrganismos psicofílicos, mesofílicos e termofílicos. Na grande maioria dos casos, a temperatura ideal para o cultivo de microalgas ocorre em condições mesofílicas (25-35 °C). Vale ressaltar, que algumas cepas termofílicas são resistentes a uma temperaturas que podem chegar até 60 °C. Infelizmente a liberação de energia na forma de calor durante o metabolismo celular na maioria sistemas de cultivo de microalgas produzem mudanças no ambiente, mas para amenizar são utilizados trocadores de calor para controlar e manter uma temperatura constante nos biorreatores (GONZALEZ-CAMEJO et al., 2019; PIRES et al., 2017; CHIU et al., 2016).

O controle do valor do pH tem um impacto muito relevante no cultivo de microalgas. Essa variável necessita ser mantida próxima ao seu valor ideal e depende fortemente da taxa fotossintética no fotobiorreator (PAWLOWSKI et al., 2019). O pH ideal das culturas de microalgas geralmente varia de neutro (pH~7) a alcalino (pH~9). No entanto, o crescimento de algumas espécies é favorecido em ampla faixa de pH, de 4 a 10. Em culturas de alta densidade celular, por exemplo, o valor do pH pode aumentar para cerca de 9, o que pode ser facilmente corrigido por aeração enriquecida com CO₂ (CO₂ puro ou de gases de combustão). Esse controle operacional é um fator dominante que determinará o pH do meio (WANG et al., 2012).

A determinação do tempo de mistura (TM) é entendida como intervalo de tempo necessário para adquirir uma diferença distinta do estado completamente misturado após a entrada do biorreator (MIRÓN et al., 2004; CHISTI et al., 1988). Esta operação é fundamental para a distribuição uniforme de nutrientes e trocas gasosas. Dessa forma, a mistura pode ser fornecida por impulsores e defletores ou por aeração com transporte aéreo ou sistema de coluna de bolhas (PEREZ-GARCIA E BASHAN, 2015). Assim, a viscosidade do meio está intimamente relacionada com a mistura, onde alta viscosidade em culturas requer maior

velocidade ou fluxo de ar, o que aumenta a potência de consumo e custos operacionais. A viscosidade vem principalmente de fonte exógena de carbono usada, mas também é aumentada com a alta concentração de células e com a produção de material celular viscoso (MARONEZE et al., 2018).

A agitação evita a sedimentação da biomassa e impede a formação de gradientes das condições de cultivo (CARVALHO, 2006). Entretanto, o aumento da velocidade de agitação implica em um maior consumo de energia para alimentar o biorreator, o que pode ser problemático para a sustentabilidade econômica do processo (FONTANILLE, 2020). Além disso, altos níveis de a agitação aumentarão as tensões de cisalhamento dentro do fotobiorreator (LINDMARK et al., 2014).

3.4 INFLUÊNCIA DO CLIMA NO CULTIVO DE MICROALGAS

Aproximadamente 90% dos cultivos de microalgas em escala comercial são cultivadas em sistemas ao ar livre. Assim, o desempenho desses bioprocessos depende fortemente das condições climáticas do local. Assim, é fundamental selecionar locais com condições climáticas que se tornem viáveis para o cultivo de microalgas (SIQUEIRA et al., 2020). Portanto, para a implantação de uma unidade industrial de microalgas, considerações precisas sobre a tendência e variabilidade do clima local são essenciais (COLEMAN et al., 2014; PEROSA et al., 2015).

Como se sabe, o clima de um lugar é estabelecido pela ação conjunta de elementos atmosféricos e fatores geográficos. Devido à sua extensão geográfica, o globo terrestre apresenta uma vasta tipologia climática, hoje existem aproximadamente 200 esquemas de classificação climática, a maioria dos quais são considerados empíricos ou analíticos e uma minoria como genética ou dinâmica. Atualmente, o modelo analítico de classificação climática de Köppen-Geiger é o mais utilizado. O modelo considera cinco grupos climáticos distribuídos em: tropical (A), seco (B), subtropical (C), frio (D) e polar (E). Esses grupos são subdivididos em outros, que possuem características específicas de cada localidade (MENDONÇA E DANNI-OLIVEIRA, 2017; PEEL et al., 2007). Uma segunda letra na classificação faz referência à precipitação (por exemplo, Df para neve e totalmente úmido) (KOTTEK et al., 2006).

Simultaneamente, devido ao movimento translacional associado a inclinação do eixo de rotação da terra o ano é subdividido em quatro estações (primavera, verão, outono e

inverno) (HASTENRATH, 2012).

Entre os fatores relacionados à geografia, a irradiação solar, a duração do dia e a temperatura são os ponto-chave que influenciam o cultivo de microalgas (KLEIN et al., 2017). Diante disso, a luz é abordada como condição limitante com a recomendação de selecionar locais de produção com alta radiação solar (CAÑEDO E LIZÁRRAGA, 2016; BARSANTI et al., 2018; BRENNAN et al., 2010). Especificamente os sistemas ao ar livre, assumem variação de temperatura como resultado da variação ambiental (sazonalidade e ciclos claro/escuro). Dependente do seu projeto, tamanho e localização podem ser instalados nos fotobiorreatores, mecanismos adicionais de aquecimento e resfriamento, como uso de mantas térmicas, bobinas, trocadores de calor, sprays e sistemas de sombreamento (WANG et al., 2012).

Em regiões temperadas, a temperatura pode aproximadamente chegar a 40 °C, ou seja, uma quantidade excessiva de calor deve ser removida por meio de sistemas de refrigeração. Com base nisso reservatórios de água têm sido mais amplamente aceitos, para evitar o superaquecimento. Mas para resfriar a superfície do fotobiorreator, especialmente em cultivos em grande escala, são requeridos volumes consideráveis de água doce. A solução mais óbvia seria usar a água do mar para esse fim, mas também há gastos de capital e operacionais (NWOBA et al., 2019). Por outro lado, em regiões de baixa temperatura, a utilização de estufas pode ser um método de aquecimento, mas é extremamente dispendioso em energia (PRUVOST, 2019).

3.5 COMPOSIÇÃO E PORTFÓLIO DE APLICAÇÕES MICROALGAIS

As microalgas são organismos autotróficos que usam a energia da luz para sintetizar numerosos compostos de alto valor, incluindo polissacarídeos, proteínas e lipídios. Simultaneamente, estão atraindo a atenção mundial devido à sua excepcional velocidade de crescimento, resistência a ambientes hostis e baixos custos de produção. Por isso, hoje as microalgas são aplicadas em diversas áreas industriais (TANG et al., 2020; ZHANG E LIU, 2021).

Por conterem grandes quantidades de proteínas, lipídios e carboidratos, as microalgas possuem grande potencial biotecnológico como matéria-prima para diversos produtos, como rações, alimentos, nutracêuticos e indústrias farmacêuticas (CHEW et al., 2017; SPOLAORE et al., 2006). Além disso, a biomassa de microalgas é considerada uma matéria-prima

energética com aplicações multifacetadas promissoras na produção de biocombustíveis sustentáveis (YEN et al., 2019).

Outro aspecto relevante a exploração de bioprodutos de microalgas está associado aos pigmentos, que são aplicados industrialmente e amplamente utilizados como intensificadores naturais de cor em alimentos e aplicações farmacológicas. Além da clorofila, as microalgas contêm pigmentos auxiliares como carotenoides (citar os principais) e, em alguns casos, ficobiliproteínas (SEVERO et al., 2019).

As microalgas também são consideradas como uma boa fonte de minerais, como magnésio, cálcio, fósforo e potássio em concentrações mais altas, além de oligoelementos (manganês, zinco, alumínio, ferro e cobre). Esses minerais tornam a biomassa uma fonte suscetível a ser aplicada como suplemento alimentar na aquicultura e também como fertilizante (SANTOS et al., 2016). Além disso, esses microrganismos também contêm em sua composição valiosas fontes de vitaminas essenciais, como as vitaminas A, B1, B2, B6, B12, C, E, nicotinato, biotina, ácido fólico e ácido pantotênico (MATOS et al., 2017).

As microalgas em comparação com outras células microbianas empregadas na síntese de enzimas industriais apresentam inúmeras vantagens, principalmente de redução de custos, devido às suas exigências nutricionais mínimas (SERIVE et al., 2012; GIL-CHAVEZ et al., 2013). Portanto, o emprego de microrganismos fotossintéticos como biofábricas de enzimas recombinantes se faz útil para a indústria e permite o uso eficiente da diversidade genética de microalgas (BRASIL et al., 2017). A tecnologia de microalgas também tem sido aplicada no tratamento de águas residuais, de modo que a biorefinaria baseada em biomassa de algas colhida de águas residuais pode ser uma solução potencialmente viável comercialmente e ecologicamente sustentável para eliminar as principais ameaças de poluição da água e demanda global de energia e de bioprodutos. As águas residuais de todas as fontes, desde domésticas a industriais, têm sido exploradas para a produção de biomassa de microalgas para a produção de biocombustíveis (KUMAR e BHRADVAJA, 2021). Portanto, a tecnologia de microalgas é considerada de alta versatilidade e grande capacidade de remediação ambiental (CHOI et al., 2021).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MICRORGANISMO E CONDIÇÕES DE CULTURA

A espécie utilizada foi a *Scenedesmus obliquus* (CPCC05) obtida da Coleção de

Culturas de Algas e Cianobactérias (CPCC) da Universidade de Toronto, Canadá. As culturas de estoque foram propagadas e mantidas em um meio sintético BG-11. O meio sintético utilizado para cultivo também foi o BG-11 K_2HPO_4 [3 g/100mL], $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [7,5 g/100mL], $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [3,6 g/100mL], citrato de amônio e ferro III [0,6 g/100mL], Na_2EDTA [0,1 g/100mL], NaCl [7,2 g/100mL], NaNO_3 [15 g/100mL], ácido cítrico [0,6 g/L/100mL], Na_2CO_3 [g/L/100mL] e metais traços: H_3BO_3 [2,86g/L], $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [1,81 g/L], $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [0,222 g/L], $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [0,390 g/L], $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ [0,079 g/L], $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [0,040 g/L]) (RIPPKA et al., 1979). As condições de incubação aplicadas foram: temperatura de 30 °C, densidade de fluxo de fótons de $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 12 h.

4.2 PROJETO DE FOTOBIORRETOR

As medições foram realizadas em um fotobiorreator de coluna de bolhas, composto por um recipiente de reação, uma câmara de fotoperíodo e um controlador (MARONEZE et al., 2016). O sistema de dispersão foi projetado em vidro de 4 mm de espessura com diâmetro interno de 9,0 cm, altura de 40 cm e volume de trabalho nominal de 2,0 L. A temperatura foi monitorada por uma camisa de água na base do fotobiorreator conectado a um banho termostático com trocador de calor interno. O reator foi iluminado com 60 lâmpadas de diodo emissor de luz (LED) localizadas na câmara de fotoperíodo. Lâmpadas de LED de espectro total foram usadas para simular a luz natural, onde o espectro tem uma faixa de comprimento de onda de 350 a 800 nm.

O controlador de fotoperíodo foi utilizado para modular a duração do dia e a intensidade da luz, que é aumentada linearmente do escuro para a intensidade máxima de luz e, após 3h, também é reduzida para o período escuro. A mistura CO_2/ar foi ajustada para atingir a concentração desejada de dióxido de carbono na corrente de ar por meio de três rotâmetros que mediram as vazões de dióxido de carbono, ar e a mistura gasosa (SIQUEIRA et al., 2020).

4.3 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Os cultivos foram realizados em fotobiorreatores operando em batelada utilizando 2,0 L de meio sintético BG-11. As condições experimentais aplicadas foram: densidade celular inicial de $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, aeração constante de 1 VVM (volume de ar por volume de meio por minuto) com ar contendo 15% de dióxido de carbono. As condições de temperatura, intensidade de luz e duração do dia são apresentadas na tabela 1.

A concentração celular foi monitorada a cada 24 horas durante a fase de crescimento dos microrganismos. Todos os cultivos foram realizados até a fase estacionária. Nesta etapa, a biomassa foi colhida por centrifugação, congelada a -20°C por 24 horas, depois liofilizada e armazenada sob refrigeração até a extração e análise da fração lipídica. Os cultivos foram realizados em duplicata e os dados cinéticos referiram-se à média de quatro análises repetidas.

4.4 SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS

Os elementos climáticos (duração do dia, irradiância solar e temperatura) de quinze posições geográficas na zona climática subtropical (25 a 35° N e S) e latitudes médias (35 a 55° N e S) foram simulados: Argel-ALG, Benoni-SAF, Changchun-CHN, Esquel-ARG, Hermosillo-MEX, Joplin-EUA, Kalgoorlie-AUS, Latina-ITA, Meerut-IND, Orange-AUS, Qom-IRI, San Miguel de Tucumán-ARG, Tanta-EGY, Taraz-KZ, Wuhu-CHN. As posições geográficas foram selecionadas de forma representativa para contemplar a tipologia climática e a predominância de cada clima da área de estudo, com base na disponibilidade simultânea de dados climatológicos normais de temperatura, irradiação solar e duração dos dias dos locais. Os dados médios mensais de temperatura, radiação solar e duração do dia usados para simular cada posição geográfica foram obtidos dos seguintes sites: Solar Electricity Handbook (SOLAR ELECTRICITY HANDBOOK, 2021) e Weatherbase (WEATHERBASE, 2021). A classificação climática de Köppen-Geiger foi utilizada para designar o tipo de clima para cada localização geográfica. As posições geográficas do estudo são elucidadas na Figura 1. O tipo climático e as condições experimentais utilizadas para cada posição geográfica são apresentados na Tabela 1.

Figura 1. Mapa-múndi da classificação climática de Köppen-Geiger com as posições geográficas da pesquisa.

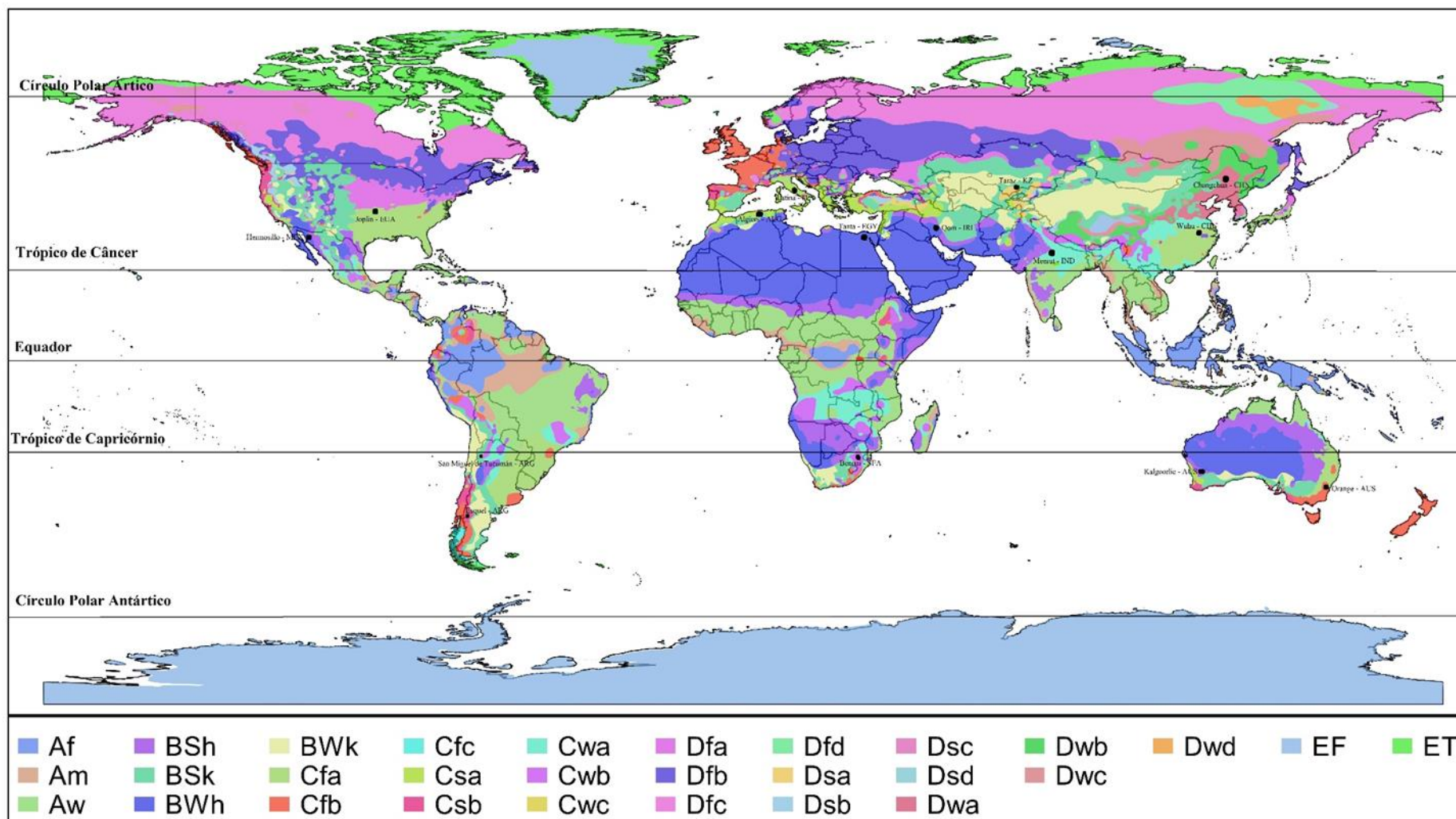


Tabela 1. Classificação climática de Köppen-Geiger e condições experimentais para cada posição geográfica.

Subtropical (25 a 35° N e S)								
Posições Geográficas	Classificação	Köppen-Geiger	Elevação (m)	Latitude	Longitude	Intensidade de luz ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Duração do dia (hr)	Temperatura (°C)
Hermosillo- MÉX	(B) Seco (W) deserto (h) quente	BWh	200	29° 04' N	110° 57W'			
Verão						2214,9 ⁱ	14,03 ^h	31,57 ^a
Outono						1891,0 ^y	11,87 ^{rs}	25,73 ^f
Inverno						1611,8 ^j	11,13 ^z	16,76 ^A
Primavera						2402,4 ^b	13,26 ^o	23,07 ⁿ
Qom- IRI			935	34° 38' N	050° 53E'			
Verão						2208,3 ^j	14,46 ^e	30,00 ^c
Outono						1659,8 ^H	11,77 ^{tu}	19,37 ^u
Inverno						1305,2 ^v	10,58 ^C	5,76 ^U
Primavera						1948,6 ^f	13,10 ^p	18,00 ^w
Tanta- EGY			16	30° 47' N	031° 00E'			
Verão						2332,9 ^c	15,13 ^c	22,60 ^o
Outono						1731,7 ^D	11,57 ^w	17,10 ^z
Inverno						1380,7 ^R	10,30 ^D	8,93 ^R
Primavera						2120,9 ⁿ	13,80 ^{kl}	14,00 ^H
Kaloorlie- AUS	(B) Seco (S) estepe (h) quente	BSh	359	30° 47' S	121° 28E'			
Verão						2445,7 ^a	14,16 ^g	25,00 ⁱ
Outono						1688,6 ^F	11,18 ^{yz}	18,00 ^w
Inverno						1414,2 ^Q	11,00 ^A	11,00 ^M
Primavera						2247,6 ^h	13,13 ^p	18,00 ^w
San Miguel de Tucumán - ARG	(C) Subtropical úmido (f) totalmente úmido (a) verão quente	Cfa	431	27° 60' S	065° 12W'			
Verão						2031,8 ^p	13,93 ⁱ	24,46 ⁱ
Outono						1821,7 ^A	12,10 ^q	21,57 ^p
Inverno						1681,2 ^G	11,13 ^z	16,60 ^B
Primavera						2182,4 ^l	13,13 ^p	21,40 ^q
Orange- AUS	(C) Subtropical úmido	Cfb	15	27° 34' S	153° 00E'			
						2253,8 ^g	13,93 ⁱ	24,33 ^f

Verão	(f) totalmente					1556,8 ^L	11,86 ^{rs}	20,00 ^m
Outono	úmido					1121,9 ^a	11,16 ^{yz}	14,00 ^H
Inverno	(b) verão quente					1936,0 ^s	13,13 _i	20,00 ^t
Primavera								
Meerut- IND	(C) Subtropical úmido	Cwa	226	28° 58' N	077° 43E'			
Verão	(w) inverno seco					1849,5 ^x	14,06 ^h	31,37 ^b
Outono	(a) verão quente					1830,7 ^z	11,90 ^f	25,17 ^h
Inverno						1582,6 ^K	11,13 ^z	12,83 ^J
Primavera						2263,0 ^f	13,23 ^o	27,70 ^d
Benoni- SAF	(C) Subtropical úmido	Cwb	1641	26°115°S	028° 19E'			
Verão	(w) inverno Seco					2116,6 ^o	13,86 ^{rs}	20,36 ^s
Outono	(b) verão quente					1832,2 ^y	12,13 ^q	16,00 ^C
Inverno						1802,3 ^B	11,20 ^y	10,73 ^O
Primavera						2132,9 ^m	13,07 ^p	17,63 ^x
Wuhu- CHN	(D) Continental úmido	Dwb	15	31° 20' N	118° 21E'			
Verão	(W) inverno seco					1523,6 ^N	14,23 ^f	26,67 ^e
Outono	(b) verão ameno					1285,5 ^X	11,83 st	17,33 ^y
Inverno						1151,2 ^a	11,00 ^A	5,00 ^V
Primavera						1353,0 ^T	13,33 ⁿ	15,00 ^D
Latitudes médias (35 a 55°N e S)								
Joplin- EUA	(C) Subtropical úmido	Cfa	298	37° 08' N	094° 29W'			
Verão	(f) Totalmente					1856,9 ^w	14,70 ^d	25,33 ^g
Outono	úmido					1371,4 ^s	11,67 ^v	14,67 ^E
Inverno	(a) verão quente					1013,8 ^y	10,60 ^{BC}	2,33 ^W
Primavera						1630,9 ⁱ	13,56 ^m	13,00 ^I
Algiers- ALG	(C)Subtropical úmido	Csa	24	36° 43' N	003° 15E'			
Verão	(s) verão seco					2279,2 ^e	14,66 ^d	23,67 ^m
Outono	(a) verão quente					1529,3 ^M	11,73 ^{uv}	19,00 ^v
Inverno						1175,2 ^Y	10,66 ^B	11,66 ^L
Primavera						1992,6 ^q	13,53 ^m	14,33 ^G

Latina- ITA			21	41° 32' S	012° 54E'			
Verão						2206,2 ^k	15,13 ^c	22,60 ^o
Outono						1345,7 ^U	11,57 ^w	17,10 ^z
Inverno						951,9 ^δ	10,30 ^D	8,93 ^R
Primavera						1800,5 ^C	14,00 ^h	14,0 ^H
Esquel- ARG	(C) Subtropical úmido	Csb	815	42° 56' S	071° 09W'			
Verão	(s) verão					2326,6 ^d	15,16 ^c	14,53 ^F
Outono	(b) verão quente					1346,2 ^U	11,43 ^x	9,40 ^Q
Inverno						864,1 ^ε	10,16 ^F	2,33 ^W
Primavera						1871,0 ^v	13,77 ^l	9,61 ^P
Taraz- KZ	(D) Continental úmido	Dsa	626	42° 54' N	071° 22E'			
Verão	(s) verão seco					1923,6 ^t	15,26 ^b	24,00 ^l
Outono	(a) verão quente					1285,5 ^x	11,53 ^w	10,80 ^N
Inverno						786,2 ^φ	10,23 ^E	1,90 ^X
Primavera						1470,5 ^p	13,33 ^h	12,00 ^K
Changchun- CHN	(D) Continental úmido	Dwa	238	43° 54' N	125° 13E'			
Verão	(w) inverno seco					1516,9 ^O	15,40 ^a	21,33 ^l
Outono	(a) verão quente					1291,9 ^w	11,57 ^w	6,33 ^T
Inverno						1095,5 ^β	10,13 ^F	-12,33 ^Y
Primavera						1703,9 ^E	13,90 ^{ij}	6,67 ^S

Diferentes letras minúsculas seguidas de diferentes letras maiúsculas dentro de uma mesma coluna expressam diferenças significativas entre as médias ($p < 0,05$).

4.5 PARÂMETROS CINÉTICOS

Dados de biomassa foram usados para calcular a produtividade de biomassa [$P_X = (X_i - X_{i-1}) \cdot (t_i - t_{i-1})^{-1}$, $\text{g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$], taxa de crescimento específica máxima [$\ln(X_i/X_0) = \mu_{\text{max}} \cdot t$, $1/\text{d}$], tempo de geração [$t_g = 0,693/\mu_{\text{max}}$, d] e produtividade lipídica [$P_L = P_X \cdot L_C$, $\text{g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$], onde X_i é a concentração de biomassa no tempo t_i (g L^{-1}), X_{i-1} é a concentração de biomassa no tempo t_{i-1} (g L^{-1}), t é o tempo de residência (d), e L_C é o conteúdo lipídico da biomassa (%). O tempo de residência foi definido como o tempo decorrido necessário para atingir a concentração máxima de biomassa.

4.6 ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA DA COMPOSIÇÃO DE MICROALGAS

Os lipídios foram extraídos de 80 mg de biomassa de microalgas de acordo com o método descrito por Vendruscolo et al. (2018) e determinado por gravimetria em estufa de circulação de ar a 105 °C. Outra porção da fração orgânica contendo os lipídios foi submetida à derivação para obtenção de ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME) (HARTMAN E LAGO, 1973). Após, 1 μL dos FAME diluídos em hexano foi injetado em modo *splitless* em um Cromatógrafo Gasoso com Detector de Ionização de Chama (GC-FID) (Varian, Star 3600, EUA). Os FAME foram separados em coluna capilar HP-88 (Agilent Technologies, EUA) ($100 \text{ m} \times 0,25 \text{ mm} \times 0,20 \mu\text{m}$) com temperatura inicial de 50 °C por 1 min, aumentando para 185 °C a 15 °C/min e depois a 0,5°C/min aumentou para 195°C e finalmente até 230 °C para 15°C/min, permanecendo por 10 min. O injetor e o detector foram mantidos a 250 °C. A identificação foi realizada comparando os tempos de retenção com os padrões do FAME Mix 37 (P/N 47885-U) (Sigma-Aldrich, EUA).

Os resultados foram expressos em porcentagem da área total levando em consideração os fatores de correção da FID e a conversão de ésteres em ácidos (VISENTANER, 2012).

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram avaliados com o teste de variância (ANOVA) e teste de Tukey ($p < 0,05$). A análise fatorial exploratória foi utilizada para verificar a relação entre dados e composição de ácidos graxos com as diferentes condições climáticas simuladas. O software Statistic 9.0 (StatSoft, Tulsa-OK, EUA) foi utilizado para realizar as análises estatísticas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EFEITOS DO CLIMA NO DESEMPENHO CINÉTICO DO SISTEMA

As microalgas são organismos seletivos e as condições de crescimento a que estão expostas são de fundamental importância para fornecer as condições ideais para um potencial aumento no crescimento e produtividade da biomassa (HUESEMANN et al., 2013). Além disso, a produção de biomassa está associada a mudanças nas diferentes variáveis climáticas de cada posição geográfica, portanto, é amplamente afetada pela resposta específica de crescimento da linhagem à luz e temperatura que variam significativamente por zona climática e latitude (SARTORI et al., 2021; SUN et al., 2020). Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta os parâmetros cinéticos da microalga *Scenedesmus obliquus* em diferentes posições geográficas localizadas na zona climática subtropical e latitudes médias, as posições geográficas foram agrupadas de acordo com o tipo de clima.

Tabela 2. Parâmetros cinéticos para *Scenedesmus obliquus* em diferentes localizações geográficas da zona climática subtropical e de latitudes médias.

Köppen-Geiger	Posição geográfica	X _{max} (g/L)	μ _{max} (d ⁻¹)	HRT(d)	tg (d)	P _x (g/L.d)	P _x Média Anual (g L ⁻¹ d ⁻¹)
Subtropical							
BWh	Hermosillo-MÉX						0,210 ^a ±0,01
	Verão	2,20 ^f ±0,02	0,68 ^b ±0,07	9 ^{abc} ±0,00	1,01 ^v ±0,04	0,233 ^{ef} ±0,21	
	Outono	2,18 ^f ±0,01	0,55 ^c ±0,06	7 ^{abcde} ±0,00	1,26 ^{qr} ±0,02	0,297 ^a ±0,11	
	Inverno	0,40 ^o ±0,06	0,21 ⁿ ±0,11	6 ^{abcde} ±0,00	3,33 ^b ±0,00	0,050 ^{stuv} ±0,48	
	Primavera	2,70 ^a ±0,01	0,58 ^c ±0,06	10 ^{ab} ±0,00	1,19 [±] 0,03	0,260 ^d ±0,14	
	Qom-IRI						0,130 ^d ±0,01
	Verão	2,56 ^{bc} ±0,02	0,83 ^a ±0,05	8 ^{abcd} ±0,00	0,84 ^w ±0,04	0,307 ^a ±0,13	
	Outono	1,88 ⁱ ±0,02	0,41 ^{ghi} ±0,08	11 ^a ±0,00	1,69 ^m ±0,02	0,161 ^{op} ±0,2	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	0,46 ⁿ ±0,06	0,24 ^m ±0,12	7 ^{abcde} ±0,00	2,88 ^e ±0,00	0,051 ^{stuv} ±0,05	
	Tanta-EGY						0,184 ^{bc} ±0,00
	Verão	2,70 ^a ±0,01	0,58 ^c ±0,06	10 ^{ab} ±0,00	1,20 [±] 0,03	0,260 ^d ±0,14	
	Outono	2,44 ^d ±0,01	0,57 ^d ±0,04	10 ^{ab} ±0,00	1,21 st ±0,02	0,234 ^{ef} ±0,11	
	Inverno	0,24 ^{pd} ±0,10	0,32 ^{jk} ±0,08	3 ^{de} ±0,00	2,16 [±] 0,01	0,046 ^{uv} ±0,05	
	Primavera	2,26 ^c ±0,01	0,44 ^{efg} ±0,09	11 ^a ±0,00	1,57 ^{no} ±0,02	0,196 [±] 0,00	
BSh	Kalgoorlie-AUS						0,081 ⁱ ±0,01
	Verão	1,66 ^l ±0,02	0,43 ^{gh} ±0,09	10 ^{ab} ±0,00	1,61 ⁿ ±0,00	0,156 ^{pq} ±0,24	
	Outono	1,62 ^l ±0,02	0,32 ^{jk} ±0,12	10 ^{ab} ±0,00	2,16 [±] 0,01	0,152 ^{pq} ±0,26	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	0,16 ^s ±0,21	0,34 ^{kl} ±0,06	4 ^{cde} ±0,00	2,03 [±] 0,02	0,015 ^x ±0,02	
Cfa	San Miguel de Tucumán – ARG						0,187 ^b ±0,00
	Verão	1,94 ⁱ ±0,01	0,45 ^{ef} ±0,06	8 ^{abcd} ±0,00	1,54 ^o ±0,02	0,230 ^{fg} ±0,13	
	Outono	1,72 ^k ±0,01	0,37 ^{ijk} ±0,05	10 ^{ab} ±0,00	1,87 ^k ±0,01	0,162 ^{nop} ±0,12	
	Inverno	1,56 ^m ±0,02	0,32 ^{jk} ±0,09	10 ^{ab} ±0,00	2,16 [±] 0,01	0,146 [±] 0,19	
	Primavera	2,00 ^h ±0,01	0,49 ^{de} ±0,05	9 ^{abc} ±0,00	1,41 ^p ±0,01	0,211 ⁱ ±0,11	
Cfb	Orange- AUS						0,134 ^d ±0,01
	Verão	2,54 ^c ±0,01	0,67 ^b ±0,04	9 ^{abc} ±0,00	1,03 ^{uv} ±0,02	0,271 ^c ±0,1	
	Outono	0,46 ⁿ ±0,07	0,26 ^{imn} ±0,11	6 ^{abcde} ±0,00	2,66 ^f ±0,01	0,060 ^{rs} ±0,51	
	Inverno	0,18 ^{rs} ±0,21	0,43 ^{fg} ±0,08	3 ^{de} ±0,00	1,61 ⁿ ±0,02	0,026 ^w ±1,46	
	Primavera	2,08 ^g ±0,02	0,34 ^{ijk} ±0,12	11 ^a ±0,00	2,03 [±] 0,01	0,180 ^{kl} ±0,02	
Cwa	Meerut- IND						0,180 ^c ±0,01
	Verão	2,60 ^b ±0,04	0,84 ^a ±0,04	9 ^{abc} ±0,00	0,82 ^w ±0,04	0,277 ^{bc} ±0,12	
	Outono	1,86 ^f ±0,08	0,40 ^{ghi} ±0,08	8 ^{abcd} ±0,00	1,73 ^{lm} ±0,01	0,220 ^{ghi} ±0,14	
	Inverno	0,20 ^{qr} ±0,11	0,34 ^{ijk} ±0,11	2 ^e ±0,00	2,00 [±] 0,00	0,050 ^{stuv} ±0,7	
	Primavera	2,00 ^h ±0,06	0,36 ^{hij} ±0,06	11 ^a ±0,00	1,92 ^k ±0,02	0,172 ^{lmn} ±0,02	
Cwb	Benoni- SAF						0,114 ^f ±0,00
	Verão	1,86 ⁱ ±0,02	0,34 ^{ijk} ±0,12	10 ^{ab} ±0,00	2,04 [±] 0,02	0,176 ^{im} ±0,26	
	Outono	0,24 ^{pd} ±0,1	0,23 ⁿ ±0,10	5 ^{bcd} ±0,00	3,01 ^d ±0,01	0,028 ^w ±0,85	
	Inverno	-	-	-	-	-	

Dwb	Primavera	1,88 ⁱ ±0,017	0,44 ^{efg} ±0,07	7 ^{abcde} ±0,00	1,57 ^{no} ±0,02	0,254 ^d ±0,12	0,090 ^h ±0,01
	Wuhu- CHN						
	Verão	2,28 ^e ±0,02	0,30 ^{kl} ±0,16	9 ^{abc} ±0,00	2,31 ^h ±0,02	0,242 ^e ±0,02	
	Outono	0,36 ^o ±0,07	0,23 ⁿ ±0,11	5 ^{bcde} ±0,00	3,01 ^d ±0,00	0,053 st ±0,52	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	0,28 ^p ±0,09	0,37 ^{hi} ±0,06	3 ^{de} ±0,00	1,87 ^k ±0,01	0,060 ^s ±0,4	
Latitudes médias							
Cfa	Joplin- EUA						0,097 ^s ±0,00
	Verão	2,06 ^g ±0,02	0,54 ^{cd} ±0,12	7 ^{abcde} ±0,00	1,28 ^{qr} ±0,03	0,280 ^{bc} ±0,2	
	Outono	0,18 ^{rs} ±0,2	0,29 ^{klm} ±0,10	2 ^e ±0,00	2,38 ^g ±0,01	0,040 ^v ±0,8	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	0,24 ^{pq} ±0,1	0,45 ^{ef} ±0,05	2 ^e ±0,00	1,54 ^o ±0,00	0,070 ^t ±0,5	
Csa	Algiers- ALG						0,122 ^s ±0,01
	Verão	2,68 ^a ±0,01	0,53 ^{cd} ±0,06	9 ^{abc} ±0,00	1,30 ^d ±0,02	0,286 ^b ±0,12	
	Outono	1,86 ⁱ ±0,01	0,40 ^{gh} ±0,07	2 ^e ±0,00	1,73 ^{lm} ±0,01	0,160 ^{op} ±0,17	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	0,40 ^o ±0,05	0,22 ⁿ ±0,1	2 ^e ±0,00	3,15 ^c ±0,00	0,042 ^{uv} ±0,52	
Csb	Latina- ITA						0,109 ^f ±0,00
	Verão	2,20 ^f ±0,02	0,64 ^b ±0,07	11 ^a ±0,00	1,08 ^u ±0,04	0,190 ^{jk} ±0,23	
	Outono	1,88 ⁱ ±0,02	0,44 ^{efg} ±0,07	8 ^{abcd} ±0,00	1,57 ^{no} ±0,02	0,222 ^{gh} ±0,4	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	0,18 ^{rs} ±0,17	0,43 ^{fg} ±0,07	3 ^{de} ±0,00	1,61 ⁿ ±0,02	0,026 ^w ±0,14	
Dsa	Esquel- ARG						0,015 ^t ±0,01
	Verão	0,22 ^{qr} ±0,15	0,39 ^{ghi} ±0,9	2 ^e ±0,00	1,77 ⁱ ±0,02	0,060 ^{rs} ±0,6	
	Outono	-	-	-	-	-	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	-	-	-	-	-	
Dwa	Taraz- KZ						0,054 ⁱ ±0,00
	Verão	2,06 ^g ±0,02	0,56 ^c ±0,08	9 ^{abc} ±0,00	1,23 ^{rst} ±0,03	0,217 ^{hi} ±0,12	
	Outono	-	-	-	-	-	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	-	-	-	-	-	
Dwa	Changchum- CHN						0,042 ^k ±0,01
	Verão	1,94 ⁱ ±0,01	0,15 ^o ±0,20	11 ^a ±0,00	4,62 ⁿ ±0,00	0,167 ^{mno} ±0,2	
	Outono	-	-	-	-	-	
	Inverno	-	-	-	-	-	
	Primavera	-	-	-	-	-	

Letras diferentes dentro de uma mesma coluna expressam diferenças significativas entre as médias ($P < 0,05$). X_{max}, densidade máxima de biomassa (g L^{-1}); μ_{max} , taxa de crescimento específico máximo (d^{-1}); RT, tempo de residência celular (d); tg, tempo de geração (d); PX, produtividade de biomassa ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$).

A produtividade da biomassa continua sendo o principal parâmetro no processo de desenvolvimento do portfólio de produtos à base de microalgas, estabelecendo a viabilidade de fabricação. Assim, avaliar a produtividade da biomassa para determinar as melhores condições de cultivo é o ponto crucial do processo (DIAS et al., 2021; SARTORI et al., 2021). Com base nisso, a Tabela 2 mostra que a variação espacial e temporal do clima resultou em produtividades estatisticamente diferentes. A maior produtividade de biomassa (0,307 g/L.d) concentrou-se na simulação da zona climática BWh (subtropical), no verão obtendo densidade máxima de biomassa (2,56 g/L), taxa de crescimento específico máxima (0,83 d⁻¹), tempo de geração (0,84d) e tempo de retenção hidráulica (8d).

Além disso, outras condições climáticas se destacaram pela alta produtividade de biomassa (0,297 g/L.d) no clima BWh (subtropical), no outono foram obtidos densidade máxima de biomassa de 2,18 g/L, taxa de crescimento específico máximo (0,55 d⁻¹), tempo de geração (1,26d), tempo de retenção hidráulica (7d). Seguido por climas Csa e Cfa (latitude média), no verão apresentando produtividade de biomassa 0,286 g/L.d e 0,280 g/L.d, densidade máxima de biomassa 2,68 g/L e 2,06 g/L, taxa de crescimento específico máximo 0,53 d⁻¹ e 0,54 d⁻¹, tempo de geração 1,30 e 1,28 e tempo de retenção hidráulica 9 e 7d, respectivamente.

Conseqüentemente, as regiões que obtiveram semelhanças climáticas tiveram os melhores resultados. Desta forma, prova que a produtividade da biomassa está diretamente ligada à combinação de fatores como temperatura, duração do dia e intensidade máxima de luz, visto que determinam a eficiência fotossintética e, além disso, podem resolver desafios substanciais em relação ao cultivo em larga escala (SARTORI et al., 2021; SUN et al., 2020). Em suma, esses resultados se devem às temperaturas utilizadas nas simulações que correspondem às particularidades dos grupos e subgrupos climáticos utilizados pela classificação climática Köppen-Geiger baseada em valores médios de temperatura do ar. De acordo com a norma estipulada, os climas do grupo seco (B), BWh e BSh têm temperaturas médias anuais de 18 °C, no grupo subtropical úmido (C) o mês mais frio tem temperatura média entre -3 °C e 18 °C, e no grupo continental úmido (D), Dwb, Dsa e Dwa que consistem em temperaturas médias anuais de -3 °C (KOTTEK et al., 2006).

As piores simulações foram localizadas no clima BSh (subtropical), na primavera com produtividade de biomassa de 0,015 g/L.d, densidade máxima de biomassa (0,16 g/L), taxa de crescimento específico máximo (0,34 d⁻¹), tempo de geração (2,03) tempo de retenção hidráulica (4d), seguido por Csa (latitudes médias) na primavera com rendimento de biomassa

(0,026 g/L.d), densidade máxima de biomassa (0,18 g/L), taxa de crescimento específico máximo ($0,43 \text{ d}^{-1}$), tempo de geração (1,61d) e tempo de retenção hidráulica (3d). Isso faz sentido porque as temperaturas nessas simulações eram de 20°C e 14°C . De acordo com RAS et al. (2013), enzimas de células microalgas são mais ativas em condições ideais de temperatura. A temperatura ótima de crescimento de microalgas do gênero *Scenedesmus* estão na faixa mesófila, que é em torno de $25\text{-}30^\circ \text{C}$ (EL-SHEEKHEI et al., 2017). Ou seja, valores abaixo de 16°C podem retardar o crescimento (DEPRÁ et al., 2021). Como resultado, algumas variações geográficas, dependendo da estação do ano, principalmente no inverno, não demonstram um crescimento significativo da biomassa, portanto, não seria viável simular algumas condições propostas, incluindo simulações climáticas Csb, Dsa e Dwa (latitude média) que têm latitudes $42^\circ 56\text{S}$, $42^\circ 54\text{N}$ e $43^\circ 54\text{N}$, respectivamente.

Além da temperatura, que é um fator extremamente sensível para o crescimento das microalgas, que influencia diretamente na produtividade, outros parâmetros dessas simulações como intensidade de luz e horas de luz por dia também influenciam na produção (LATASA et al., 1995; SEYFABADI et al., 2011; WINTER et al., 2017; XIN et al., 2011). De acordo com CHEREGI et al. (2019), isso pode ser explicado pelo fato de que o crescimento de microalgas é geralmente limitante nessas áreas devido às baixas intensidades de luz, fotoperíodo curto e baixas temperaturas. Em resumo, em latitudes acima de 66°N , ao norte do círculo polar, o crescimento das algas é afetado pela escuridão prolongada durante o inverno nórdico e, em algumas regiões, pela cobertura de gelo. Assim, por este motivo, a latitude máxima simulada foi $43^\circ 54 \text{N}$.

Portanto, é necessário analisar a produtividade das microalgas ao longo do ano, pois, de acordo com a latitude, as estações podem apresentar, entre si, variações marcantes nos elementos climáticos (duração do dia, irradiância solar e temperatura). Nesse sentido, a Tabela 2 também apresenta a produtividade média anual de biomassa, os resultados demonstram que a maior produção foi encontrada na simulação do clima BWh (subtropical) no município de Hermosillo-MEX ($0,210 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$), seguido do clima Cfa na cidade de San Miguel de Tucumán-ARG (subtropical) ($0,187 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$), clima BWh (subtropical) na cidade de Tanta-EGY ($0,184 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$), Cwa (subtropical) na cidade de Meerut-IND ($0,180 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e o Cfb (subtropical) na cidade de Orange-AUS ($0,134 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Analisando esses resultados, é visível que os climas da zona subtropical (25 a 35°N e S) apresentam a melhor produtividade média anual. Por outro lado, na zona de latitudes médias (35 a 55°N e S) apresenta pouca produção, o que seria potencialmente inviável para a realização de processos

em larga escala baseados em microalgas.

De acordo com Siqueira et al. (2020), é muito importante observar que o desempenho do sistema em relação à produção de biomassa parece ser maior em regiões próximas ao Equador (latitude 0°), pois quanto mais longe do Equador, mais inclinados se encontram os raios solares, portanto, as regiões recebem menos radiação solar, resultando em temperaturas mais baixas. Assim, enquanto a luz afeta principalmente a fotossíntese, a temperatura afeta todas as atividades moleculares e, portanto, o metabolismo.

Algumas soluções podem ser realizadas em relação à zona climática de latitudes médias, onde apresentam variações sazonais de temperatura. Entre essas soluções, uma interrupção da produção durante esses meses economizaria energia e custos de mão de obra. Considerando que a produção de biomassa é relativamente baixa em algumas estações, principalmente no inverno (SPRUIJT et al., 2015).

Como pode ser visto nos resultados, na zona climática de latitudes médias, a maior produtividade concentrou-se no verão. Mazzelli et al. (2020) ao avaliar o crescimento da microalga *Tetradismus obliquus* em climas localizados na zona de latitude média (35 a 55° N e S), também concluíram uma relação positiva na produtividade da biomassa durante o verão. Este fato se deve ao aumento da temperatura e da luz, obtendo assim uma relação direta com o aumento da fotoprodução.

Regiões com altos níveis de intensidade luminosa tendem a ser ideais para a produção de microalgas, como é o caso da zona de clima subtropical (25 a 35° N e S). Porém, alguns locais podem receber intensidades de luz demasiadas, de forma que a temperatura nos fotobiorreatores pode atingir aproximadamente 50 °C. Como consequência, isso resultará em perdas de rendimento ou até mesmo no colapso da cultura. O controle da temperatura torna-se essencial para evitar grandes perdas na produtividade da biomassa, utilizando sistemas de refrigeração para manter as temperaturas de 28 a 30 °C. Técnicas como resfriamento mecânico, sombreamento ou pulverização de água podem oferecer uma solução, porém, a aplicação desses métodos de resfriamento deve ser evitada ao máximo devido ao alto custo que agregam a produção, mais precisamente o custo de energia (BARTEN et al., 2021; MAZZELLI et al., 2018; RUIZ et al., 2016).

A título de comparação, um estudo de Parsy et al. (2021), sobre a avaliação do impacto das condições climáticas por microalgas nas quatro estações do sudoeste da França, que é cercada por vários climas diferentes, mas o predominante é o Cfb, os resultados mostraram que a taxa de crescimento específico (d^{-1}), durante o verão ($0,15 d^{-1}$), foi maior que

no inverno (0,03 d⁻¹), seguido por primavera e outono (0,10 d⁻¹ e 0,11 d⁻¹), respectivamente. Corroborando os resultados encontrados neste estudo, onde a maioria dos resultados evidenciou que o verão apresentou a maior taxa de crescimento específico (d⁻¹), entre as demais estações.

5.2 EFEITOS DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA E DA ESTAÇÃO NA PRODUÇÃO DE LÍPIDIOS E ÁCIDOS GRAXO

Os principais fatores que afetam as atividades metabólicas das microalgas são as condições de luz e temperatura, especialmente a biossíntese de lipídios (KHOEYI et al., 2011). Nesse sentido, a Tabela 3 mostra o teor de lipídios, a produção de lipídios e a produtividade média anual de lipídios.

Tabela 3. Teor lipídico e produtividade lipídica de *Scenedesmus obliquus* CPCC05.

Köppen-Geiger	Posição geográfica	L (%)	P _L (g L ⁻¹ d ⁻¹)	P _L média anual (g L ⁻¹ d ⁻¹)
		Subtropical		
BWh	Hermosillo – MÉX			0,037 ^a ±0,00
	Verão	13,54 ^f ±0,00	0,031 ^{cd} ±0,01	
	Outono	11,79 ⁿ ±0,00	0,035 ^{bc} ±0,01	
	Inverno	10,41 ^w ±0,00	0,050 ^a ±0,02	
	Primavera	11,58 ^c ±0,00	0,030 ^{de} ±0,02	
	Qom- IRI			0,011 ^{cd} ±0,00
	Verão	6,76 ^G ±0,00	0,020 ^f ±0,01	
	Outono	11,10 ^q ±0,00	0,018 ^{gh} ±0,01	
	Inverno	-	-	
	Primavera	13,95 ^d ±0,00	0,0071 ^{jk} ±0,01	
	Tanta- EGY			0,019 ^b ±0,00
	Verão	10,74 ^s ±0,00	0,028 ^{de} ±0,01	
	Outono	13,18 ^h ±0,00	0,031 ^{cd} ±0,03	
	Inverno	8,43 ^B ±0,00	0,004 ^{klm} ±0,01	
	Primavera	7,80 ^E ±0,00	0,015 ^{gh} ±0,02	
BSh	Kalgoorlie- AUS			0,009 ^{de} ±0,00
	Verão	9,44 ^y ±0,00	0,015 ^{gh} ±0,00	
	Outono	13,74 ^e ±0,00	0,020 ^f ±0,02	
	Inverno	-	-	
	Primavera	8,05 ^D ±0,00	0,001 ^m ±0,01	
Cfa	San Miguel de Tucumán -ARG			0,019 ^b ±0,00
	Verão	13,32 ^s ±0,00	0,031 ^{cd} ±0,02	
	Outono	10,60 ^u ±0,00	0,017 ^{fgh} ±0,01	
	Inverno	13,76 ^e ±0,00	0,020 ^f ±0,01	
	Primavera	5,21 ^J ±0,00	0,010 ^{ij} ±0,02	
Cfb	Orange -AUS			0,015 ^{bc} ±0,00
	Verão	12,06 ^m ±0,00	0,030 ^{de} ±0,01	
	Outono	10,47 ^v ±0,00	0,006 ^{ijkl} ±0,02	
	Inverno	13,00 [±] 0,00	0,003 ^{klm} ±0,01	
	Primavera	11,79 ⁿ ±0,00	0,021 ^f ±0,01	
Cwa	Meerut- IND			0,020 ^b ±0,00
	Verão	12,56 ^l ±0,00	0,035 ^{bc} ±0,01	
	Outono	8,04 ^D ±0,00	0,018 ^{fgh} ±0,01	
	Inverno	4,32 ^K ±0,00	0,002 ^{lm} ±0,01	
	Primavera	15,52 ^b ±0,00	0,026 ^e ±0,02	
Cwb	Benoni- SAF			0,0013 ^f ±0,00
	Verão	11,12 ^a ±0,00	0,019 ^{fg} ±0,02	

	Outono	10,68 ^t ±0,00	0,003 ^{klm} ±0,01	
	Inverno	-	-	
	Primavera	12,80 ⁱ ±0,00	0,032 ^{bcd} ±0,01	
Dwb	Wuhu - CHN			0,012 ^{cd} ±0,00
	Verão	14,75 ^c ±0,00	0,036 ^b ±0,01	
	Outono	13,18 ^a ±0,00	0,0070 ^{jk} ±0,02	
	Inverno	-	-	
	Primavera	8,58 ^A ±0,00	0,005 ^{klm} ±0,01	
Latitudes médias				
Cfa	Joplin - EUA			0,009 ^{de} ±0,00
	Verão	11,37 ^p ±0,00	0,032 ^{bcd} ±0,01	
	Outono	8,20 ^C ±0,00	0,003 ^{klm} ±0,01	
	Inverno	-	-	
	Primavera	4,28 ^K ±0,00	0,002 ^{lm} ±0,00	
Csa	Algiers- ALG			0,015 ^{bc} ±0,00
	Verão	12,62 ^k ±0,00	0,036 ^b ±0,01	
	Outono	10,80 ^f ±0,00	0,017 ^{igh} ±0,01	
	Inverno	-	-	
	Primavera	13,95 ^d ±0,00	0,006 ^{jkl} ±0,00	
	Latina- ITA			0,013 ^{cd} ±0,00
	Verão	7,20 ^F ±0,00	0,014 ^{hi} ±0,01	
	Outono	16,27 ^a ±0,00	0,036 ^b ±0,01	
	Inverno	-	-	
	Primavera	5,81 ^H ±0,00	0,001 ^m ±0,01	
Csb	Esquel- ARG			0,0007 ^f ±0,00
	Summer	5,61 ^L ±0,00	0,003 ^{klm} ±0,02	
	Autumn	-	-	
	Winter	-	-	
	Spring	-	-	
Dsa	Taraz- KZ			0,005 ^{ef} ±0,00
	Summer	9,80 ^x ±0,00	0,021 ^f ±0,00	
	Autumn	-	-	
	Winter	-	-	
	Spring	-	-	
Dwa	Changchun- CHN			0,004 ^{ef} ±0,01
	Verão	8,73 ^z ±0,00	0,015 ^{gh} ±0,01	
	Outono	-	-	
	Inverno	-	-	
	Primavera	-	-	

Letras diferentes dentro da mesma coluna expressam diferenças significativas entre as médias ($P < 0,05$). L, teor de lipídios (%); P_L, produtividade lipídica ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$).

Os teores máximos de lipídios totais (16,27 %) foram obtidos no clima Csa (latitudes médias) no outono, quando a cultura foi submetida a um dia de duração de 11,57 h, intensidade de luz $1345,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e temperatura de $17,10 \text{ }^\circ\text{C}$. Por outro lado, o menor teor de lipídios (4,28 %) foi encontrado no clima Cfa (latitudes médias) na primavera, com duração do dia $13,56 \text{ h}$, intensidade de luz $1630,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e temperatura $13 \text{ }^\circ\text{C}$. Nossos achados são corroborados por Siqueira (2020) onde o teor máximo de lipídios totais (16,98 %) foi obtido em baixas temperaturas ($12,8 \text{ }^\circ\text{C}$), quando a cultura foi exposta a um dia de duração de $10,45 \text{ h}$, intensidade luminosa de $1556,3 \mu\text{mol. m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Coronel e Curatti (2021) obtiveram dados semelhantes onde níveis máximos de lipídios totais (22,57 %) foram observados na simulação mais fria avaliada.

No entanto, deve-se considerar que o conteúdo lipídico por si só não é um parâmetro

adequado para avaliar a produção de óleo unicelular. É mais preciso avaliar a produção de óleo unicelular em termos de produtividade de lipídios, que é obtida pelo número de lipídios celulares multiplicado pela produtividade de biomassa (QUEIROZ et al., 2011). Nos dados apresentados na Tabela 3, isso foi observado, os maiores rendimentos de lipídios foram localizados em simulações onde os rendimentos de biomassa também foram elevados. Conseqüentemente, a produtividade média anual de lipídios também se comportou de forma semelhante à produtividade média anual de biomassa, onde os maiores valores foram encontrados na simulação do clima BWh (subtropical) no município de Hermosillo-MÉX ($0,037 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$), seguido pelo clima Cwa (subtropical) na cidade de Meerut-IND ($0,020 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$).

Nesse contexto, conforme observado por SU et al. (2016), mudanças na exposição à luz não afetam apenas a fotossíntese e a taxa de crescimento do microrganismo, mas também influenciam a atividade do metabolismo celular e a composição química da biomassa. Assim, os lipídios são produtos intracelulares de microalgas e, portanto, a produtividade dos lipídios é o produto do teor de lipídios e da produtividade da biomassa. Assim, o melhor produtor de lipídios deve combinar a produtividade de biomassa e o teor de lipídios. De acordo com Hempel et al. (2012), a produtividade da biomassa tem mais impacto na produtividade lipídica do que no conteúdo lipídico.

A composição de ácidos graxos (FAs) na biomassa de *S. obliquus* é mostrada na Tabela 4. Os constituintes predominantes na maioria das simulações de cultura foram palmítico (C16:0), oleico (C18:1n9c), linoleico (C18:2n6c) e α -ácido linolênico (C18:3n3) como esperado, pois, são encontrados na maioria das plantas superiores (QUEIROZ et al., 2018).

Tabela 4. Perfil de ácidos graxos de *Scenedesmus obliquus* sob diferentes condições climáticas.

Köppen-Geiger	Posições geográficas	Ácidos graxos (g/100gDCW)												Minorias	ΣSFA	ΣMUFA	ΣPUFA	
		C11:0	C12:0	C13:0	C16:0	C16:1	C17:1	C18:0	C18:1n9c	C18:2n6c	C18:3n3	C20:2	C21:0					
Subtropical																		
BWh	Hermossillo-MÉX																	
	Verão	1,05 ^c ±0,08	ND	ND	2680 ^c ±0,37	0,32 ^{AB} ±0,00	3,59 ^c ±0,01	4,50 ^j ±0,00	19,55 ^b ±0,63	10,53 ^b ±0,5	31,19 ^q ±0,31	ND	ND	2,47 ^m ±0,00	33,38 ⁱ	23,76 ^f	42,86 ^e	
	Outono	ND	0,51 ^a ±0,04	2,07 ^c ±0,14	33,02 ^a ±1,48	3,05 ^d ±0,32	ND	1,49 ^a ±0,10	14,75 ^c ±0,28	9,71 ^m ±0,37	30,63 ^c ±0,86	ND	2,99 ^b ±0,24	1,78 ^e ±0,09	41,12 ^f	17,95 ^d	40,93 ^v	
	Inverno	ND	1,22 ^m ±0,07	0,50 ^c ±0,03	25,76 ^d ±1,18	0,36 ^z ±0,03	0,15 ^{kl} ±0,01	1,49 ^a ±0,16	18,20 ^c ±0,76	9,16 ^o ±0,29	35,23 ^b ±1,66	ND	5,13 ^e ±0,37	2,81 ^d ±0,15	35,34 ^p	19,83 ^m	44,84 ^p	
	Primavera	ND	ND	ND	40,71 ^f ±0,01	0,27 ^B ±0,01	ND	2,49 ^s ±0,19	27,46 ^a ±0,09	8,46 ^f ±0,16	18,50 ^e ±0,56	0,18 ^e ±0,00	0,13 ^m ±0,00	1,81 ^r ±0,00	44,07 ^p	27,84 ^b	28,10 ^k	
	Qom-IRI																	
	Verão	ND	ND	ND	39,18 ^m ±0,47	4,05 ^c ±0,22	ND	2,99 ^m ±0,05	23,27 ^d ±0,05	7,01 ^k ±0,15	17,41 ^f ±0,25	4,06 ^e ±0,31	ND	2,04 ^w ±0,07	43,45 ⁿ	27,39 ^e	29,17 ^F	
	Outono	ND	1,65 ^b ±0,07	0,86 ^a ±0,03	29,23 ^A ±1,18	0,35 ^{zA} ±0,03	0,05 ^z ±0,01	1,86 ^m ±0,16	10,78 ^o ±0,76	13,94 ^e ±0,29	33,56 ^e ±0,37	ND	5,35 ^b ±0,37	2,37 ^o ±0,15	39,87 ^w	12,47 ^A	47,66 ^k	
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primavera	ND	2,02 ^a ±0,22	1,23 ^b ±0,12	27,80 ^G ±0,16	0,56 ^v ±0,04	ND	1,32 ^D ±0,06	6,79 ^H ±0,38	5,80 ^B ±0,24	52,36 ^a ±1,65	ND	ND	2,12 ^z ±0,10	33,62 ^H	7,91 ^K	58,47 ^p	
	Tanta-EGY																	
	Verão	ND	ND	ND	40,71 ^f ±0,47	0,27 ^B ±0,26	ND	2,49 ^s ±0,19	27,46 ^a ±0,09	8,46 ^f ±0,16	18,50 ^e ±0,56	0,18 ^e ±0,00	0,13 ^m ±0,13	1,81 ^r ±0,01	44,07 ^p	27,84 ^b	28,10 ^k	
	Outono	0,94 ^a ±0,04	ND	ND	28,91 ^B ±0,33	0,31 ^{zAB} ±0,01	3,21 ^f ±0,11	8,78 ^c ±0,83	17,33 ^o ±0,85	9,47 ^o ±0,33	28,90 ^o ±0,20	ND	ND	2,15 ^w ±0,13	39,73 ^c	21,15 ^x	39,12 ^x	
	Inverno	ND	1,49 ^m ±0,12	0,94 ND ±0,03	26,57 ^o ±0,09	0,59 ^z ±0,09	0,09 ^m ±0,00	1,51 ^A ±0,08	9,54 ^o ±0,17	3,47 ^o ±0,18	49,48 ^c ±0,92	ND	3,58 ^o ±0,17	2,66 ^o ±0,19	35,35 ^p	11,43 ^D	53,21 ^e	
Primavera	ND	ND	ND	40,24 ^d ±0,73	3,19 ^b ±0,11	ND	3,46 ^e ±0,13	24,05 ^c ±0,38	7,74 ^o ±0,43	14,82 ^e ±0,39	4,64 ^z ±0,04	ND	1,85 ^v ±0,08	44,82 ^p	27,36 ^e	27,81 ^L		
BSh	Kalgoorlie-AUS																	
	Verão	ND	2,69 ^b ±0,04	1,81 ^d ±0,02	41,28 ^a ±0,01	0,75 ^s ±0,01	ND	2,14 ^z ±0,03	13,31 ^f ±0,26	10,10 ^l ±0,04	24,57 ^o ±0,18	ND	ND	3,36 ^f ±0,00	49,10 ^f	15,50 ^f	35,41 ^A	
	Outono	ND	ND	ND	39,17 ^m ±0,26	1,13 ^z ±0,07	ND	2,60 ^o ±0,03	21,23 ^o ±0,43	8,04 ^o ±0,38	18,67 ^o ±0,43	5,34 ^z ±0,45	ND	3,82 ^z ±0,03	44,43 ^o	22,84 ^b	32,73 ^C	
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primavera	ND	1,80 ^o ±0,15	1,18 ^o ±0,08	54,31 ^d ±0,75	5,20 ^b ±0,26	ND	1,38 ^{BC} ±0,01	4,11 ^z ±0,40	5,93 ^A ±0,33	14,21 ^z ±0,29	ND	ND	11,88 ^z ±0,01	60,42 ^d	10,13 ^F	29,46 ^D	
Cfa	San Miguel de Tucumán-ARG																	
	Verão	ND	0,44 ^z ±0,03	1,70 ^f ±0,14	31,07 ^z ±0,40	2,99 ^l ±0,15	ND	2,56 ^q ±0,22	15,39 ^p ±1,14	11,79 ^z ±0,25	29,04 ^z ±1,14	ND	3,11 ^z ±0,11	1,91 ^z ±0,05	40,01 ^v	18,57 ⁿ	41,42 ^z	
	Outono	ND	0,19 ^z ±0,01	ND	29,56 ^z ±0,68	2,88 ^k ±0,19	ND	0,78 ^f ±0,04	10,09 ^A ±0,49	10,17 ^z ±0,64	38,31 ^f ±1,29	6,62 ^z ±0,49	ND	1,40 ^z ±0,02	31,39 ^k	13,07 ^v	55,54 ^d	
	Inverno	0,74 ^z ±0,06	ND	ND	30,07 ^z ±0,40	0,48 ^w ±0,02	2,71 ^z ±0,22	4,93 ^z ±0,39	18,07 ^z ±0,43	10,41 ^z ±0,38	29,10 ^z ±0,43	ND	ND	3,49 ^z ±0,09	36,88 ^b	21,58 ^z	41,54 ^z	
	Primavera	ND	0,98 ^z ±0,04	3,43 ^z ±0,14	56,11 ^c ±1,48	5,42 ^z ±0,32	ND	1,78 ^z ±0,10	6,11 ^z ±0,28	5,58 ^z ±0,37	19,41 ^z ±0,86	ND	1,85 ^z ±0,24	4,33 ^z ±0,09	65,68 ^e	8,83 ^z	25,49 ^z	
Cfb	Orange-AUS																	
	Verão	ND	ND	ND	40,30 ^z ±2,67	2,06 ^z ±0,20	ND	2,77 ^z ±0,26	22,95 ^z ±0,62	9,13 ^z ±0,89	19,24 ^C ±1,20	0,03 ^z ±0,00	0,04 ^z ±0,00	3,48 ^z ±0,12	46,03 ^m	25,10 ^d	28,87 ^G	
	Outono	ND	1,22 ^m ±0,07	0,50 ^z ±0,03	25,76 ^d ±1,18	0,36 ^z ±0,03	0,15 ^{kl} ±0,01	1,49 ^a ±0,16	18,20 ^c ±0,76	9,16 ^o ±0,00	35,23 ^b ±0,37	ND	5,13 ^e ±0,37	2,80 ^z ±0,15	35,34 ^p	19,83 ^m	44,83 ^p	
	Inverno	ND	2,13 ^z ±0,14	1,70 ^z ±0,06	52,36 ^d ±1,05	6,62 ^z ±0,23	ND	1,35 ^{CD} ±0,10	5,10 ^z ±0,06	12,15 ^z ±0,48	4,00 ^z ±0,02	ND	ND	14,59 ^z ±0,02	58,92 ^z	12,92 ^z	28,16 ^z	
	Primavera	ND	ND	ND	29,99 ^z ±0,18	3,82 ^z ±0,23	ND	1,08 ^E ±0,02	15,97 ^z ±0,22	11,20 ^z ±0,52	30,66 ^z ±0,39	5,92 ^z ±0,25	ND	1,35 ^z ±0,06	31,84 ^z	19,86 ^m	48,29 ^z	
Cwa	Meerut-IND																	
	Verão	1,24 ^c ±0,03	ND	ND	26,01 ^f ±0,039	0,35 ^{zA} ±0,01	4,70 ^z ±0,12	5,40 ^z ±0,00	14,88 ^z ±0,76	10,40 ^z ±0,04	34,82 ^z ±0,58	ND	ND	2,20 ^z ±0,04	33,60 ^H	20,15 ^z	46,25 ^m	
	Outono	ND	ND	ND	41,07 ^z ±0,52	1,71 ^z ±0,04	ND	2,66 ^z ±0,09	22,31 ^z ±0,32	7,62 ^z ±0,10	16,64 ^z ±0,36	3,90 ^z ±0,03	ND	4,09 ^z ±0,07	46,46 ^z	24,55 ^z	28,99 ^F	
	Inverno	ND	0,67 ^z ±0,04	0,44 ^z ±0,02	62,76 ^z ±1,20	1,84 ^z ±0,08	0,12 ^{im} ±0,02	3,24 ^z ±0,24	7,14 ^z ±0,07	2,65 ^z ±0,12	16,85 ^z ±0,40	ND	1,79 ^z ±0,12	2,49 ^z ±0,18	70,5 ^z	9,78 ^H	19,71 ^O	
Cw	Benoni- SAF																	
	Verão	ND	2,37 ^c ±0,06	1,44 ^z ±0,07	29,52 ^z ±0,74	0,41 ^{zy} ±0,02	0,21 ^z ±0,01	2,08 ^z ±0,18	13,25 ^z ±1,22	15,16 ^z ±1,28	33,04 ^z ±1,91	ND	ND	2,52 ^z ±0,10	37,22 ^A	14,29 ^z	48,49 ^b	
	Outono	ND	1,84 ^z ±0,00	1,05 ^z ±0,01	35,16 ^z ±0,23	1,79 ^z ±0,03	ND	2,04 ^z ±0,17	11,43 ^z ±0,24	6,16 ^z ±0,03	37,82 ^z ±0,12	ND	ND	2,71 ^z ±0,06	41,67 ^z	13,26 ^z	45,07 ^p	
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dwb	Wuhu- CHN																	
	Verão	0,56 ^z ±0,02	ND	ND	26,74 ^H ±0,21	0,31 ^{zAB} ±0,01	4,53 ^z ±0,05	6,74 ^z ±0,36	12,98 ^z ±0,05	10,40 ^z ±0,14	35,34 ^z ±0,29	ND	ND	2,31 ^z ±0,06	34,92 ^E	18,04 ^P	47,04 ^z	
	Outono	2,51 ^z ±0,00	ND	ND	25,95 ^z ±0,00	3,83 ^z ±0,00	1,26 ^z ±0,01	7,62 ^z ±0,00	17,54 ^z ±0,00	6,14 ^z ±0,00	29,63 ^z ±0,00	ND	ND	5,52 ^z ±0,00	38,55 ^z	23,39 ^F	38,06 ^z	
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primavera	ND	1,67 ^z ±0,12	0,98 ^z ±0,03	26,69 ^H ±0,09	0,65 ^z ±0,04	0,10 ^{im} ±0,00	1,40 ^{BC} ±0,08	9,78 ^z ±0,17	3,79 ^z ±0,18	48,18 ^z ±0,92	ND	3,82 ^z ±0,17	2,94 ^z ±0,19	35,65 ^C	11,67 ^C	52,68 ^F	
Latitudes médias																		
Cfa	Joplin- EUA																	
	Verão	ND	0,54 ^m ±0,04	2,04 ^z ±0,14	30,30 ^m ±1,48	3,32 ^f ±0,32	ND	1,62 ^z ±0,10	14,71 ^f ±0,28	10,40 ^z ±0,37	32,34 ^z ±0,86	ND	3,11 ^z ±0,18	1,63 ^z ±0,09	38,54 ^z	18,17 ^z	43,30 ^f	
	Outono	ND	1,12 ^z ±0,06	1,12 ^z ±0,04	34,20 ^z ±0,56	3,60 ^z ±0,28	0,16 ^z ±0,01	1,80 ^z ±0,20	6,42 ^z ±0,08	10,12 ^z ±0,40	26,26 ^z ±0,28	0,04 ^z ±0,01	4,20 ^z ±0,20	10,66 ^z ±0,10	52,34 ^f	11,05 ^E	36,61 ^z	
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primavera	ND	0,56 ^z ±0,01	0,40 ^z ±0,00	58,76 ^z ±0,40	1,92 ^m ±0,03	0,16 ^z ±0,00	3,26 ^m ±0,30	8,14 ^z ±0,62	2,62 ^f ±0,02	16,80 ^z ±0,04	ND	1,74 ^z ±0,02	5,64 ^z ±0,12	66,10 ^b	9,78 ^H	24,12 ^N	
Csa	Algiers- ALG																	
	Verão	1,43 ^b ±0,10	ND	ND	34,50 ^z ±0,71	0,30 ^{AB} ±0,02	3,87 ^z ±0,17	12,30 ^z ±1,0	17,63 ^z ±0,19	8,74 ^z ±0,30	17,46 ^z ±1,04	ND	ND	3,77 ^z ±0,13	49,60 ^z	22,10 ^f	28,30 ^f	
	Outono	ND	1,61 ^z ±0,08	0,91 ^m ±0,05	28,14 ^C ±0,69	0,33 ^{zA} ±0,01	0,05 ^z ±0,00	1,58 ^z ±0,16	10,66 ^z ±0,13	14,21 ^z ±0,17	34,60 ^z							

Csb	Primavera	ND	2,43 ^d ±0,22	1,47 ^f ±0,12	27,66 ^E ±0,16	0,63 ^m ±0,04	ND	1,41 ^B ±0,06	6,94 ^G ±0,38	6,15 ^z ±0,24	51,05 ^b ±0,85	ND	ND	2,25 ⁱ ±0,10	34,30 ^G	8,19 ^j	57,50 ^b
	Latina-ITA																
	Verão	ND	ND	ND	38,79 ^a ±0,73	3,26 ^g ±0,11	ND	3,33 ^l ±0,13	24,82 ^b ±0,38	8,26 ^s ±0,43	14,99 ^l ±0,39	4,64 ^d ±0,04	ND	1,91 ^x ±0,08	43,27 ^r	28,22 ^a	28,51 ^H
	Outono	0,99 ^f ±0,04	ND	ND	26,86 ^F ±1,77	0,44 ^{wx} ±0,00	4,21 ^c ±0,30	9,89 ^b ±0,09	8,21 ^D ±0,55	8,25 ^s ±0,39	38,03 ^g ±2,05	ND	ND	3,12 ^h ±0,02	38,94 ^z	13,03 ^y	48,02 ^J
Dsa	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primavera	ND	1,84 ^b ±0,00	1,03 ^k ±0,01	34,69 ^e ±0,23	1,72 ^o ±0,03	ND	1,70 ^o ±0,17	11,91 ^v ±0,24	6,23 ^z ±0,03	38,06 ^g ±0,12	ND	ND	2,82 ⁿ ±0,06	40,48 ^u	14,08 ^v	45,44 ⁿ
	Esquel-ARG																
	Verão	ND	1,46 ^{kl} ±0,06	0,92 ^m ±0,06	37,45 ^e ±0,05	0,36 ^{xy} ±0,03	0,04 ⁿ ±0,00	3,63 ^l ±0,36	6,29 ^j ±0,00	7,13 ^w ±0,53	36,76 ⁱ ±1,22	ND	2,95 ^l ±0,27	3,01 ^l ±0,00	48,01 ^j	7,93 ^k	44,06 ^l
Dwa	Outono	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primavera	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Taraz- KZ																
Dwa	Verão	ND	3,35 ^a ±0,27	2,45 ^b ±0,10	37,26 ^P ±0,75	0,82 ^f ±0,02	ND	2,38 ^l ±0,21	10,90 ^s ±0,48	9,67 ^m ±0,16	28,80 ^w ±0,02	ND	ND	4,36 ^f ±0,00	46,71 ^k	13,65 ^w	39,63 ^w
	Outono	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Primavera	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dwa	Changchun- CHN																
	Verão	ND	2,62 ^e ±0,26	1,73 ^c ±0,02	41,59 ^f ±1,52	0,97 ^h ±0,02	ND	2,36 ^l ±0,11	15,40 ^p ±0,36	10,76 ^k ±0,42	20,23 ^h ±0,94	ND	ND	4,34 ^f ±0,00	49,48 ^h	17,82 ^f	32,70 ^c
	Outono	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Primavera	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Valores com a mesma letra na mesma coluna indicam que não há diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$). Os valores são a média \pm SD de três réplicas. ND: não detectado; SFA: ácido graxo saturado; MUFA: ácido graxo monoinsaturado; PUFA: ácido graxo poliinsaturado.

O aumento adaptativo na dessaturação lipídica em resposta a baixas temperaturas é uma competência comum das microalgas para manter a fluidez da membrana. Em contraste, mudar o perfil dos FAs devido às mudanças nas condições de luz associadas às mudanças na temperatura é um procedimento profundo e menos abrangente (KLYACHKO-GURVICHK et al., 1999). A temperatura não apenas reflete no crescimento celular, mas também influencia a composição de ácidos graxos das microalgas (HU et al., 2021).

Nossos achados são corroborados por Dias et al. (2021), onde a temperatura de cada clima influencia os resultados. Os climas correspondentes às baixas temperaturas estiveram entre aqueles com os maiores valores de PUFAs e os menores valores de SFAs e MUFAs. Por outro lado, climas com preços mais elevados apresentam resultados opostos. Aussant et al. (2018), explica em seu estudo, que baixas temperaturas reduzem a fluidez das membranas celulares e, para apoiar a integridade estrutural, as células tendem a sintetizar FAs insaturados. Ou seja, em temperaturas mais baixas, a concentração de PUFAs aumenta, enquanto a concentração de SFAs e MUFAs aumenta com o aumento da temperatura.

Por fim, os resultados apresentados mostraram que as melhores simulações em relação à produtividade de biomassa e lipídios foram obtidas na zona de clima subtropical (25 a 35° N e S). Levando em conta não só o clima predominante, mas também a latitude em que estão localizados. Por outro lado, ficou evidente que a zona climática de latitude média não favorece o cultivo de microalgas, devido à baixa produtividade anual, onde algumas safras apresentam condições desfavoráveis, necessitando interromper sua produção neste período.

6 CONCLUSÃO GERAL

A estratégia proposta neste trabalho permitiu simular o efeito da posição geográfica e do clima local sobre o desempenho de fotobiorreatores na zona de clima subtropical (25 a 35° N e S) e na zona de latitude média (35 a 55° N e S) do mundo. Os melhores resultados foram encontrados na zona de clima subtropical (25 a 35° N e S), concomitantemente, o clima desértico quente (BWh) apresentou as melhores condições, em termos de produção de biomassa e lipídios, em um panorama anual. Os maiores rendimentos médios anuais de biomassa ($0,210 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e médias anuais de lipídios ($0,037 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) foram registrados no município de Hermosillo-MEX. Desta forma, a produtividade continua crescendo ao longo do ano, podendo ser colhidas simultaneamente, sem a necessidade de entressafra. Devido à influência das variáveis climáticas (duração do dia, irradiância solar e temperatura) e a posição geográfica (latitude). Portanto, possibilitando o mapeamento de locais específicos potencialmente viáveis para a implantação de instalações de processamento à base de microalgas.

REFERÊNCIAS

- ABOMOHRRA, A. E. F.; JIN, W.; EL-SHEEKH, M. Enhancement of lipid extraction for improved biodiesel recovery from the biodiesel promising microalga *Scenedesmus obliquus*. **Energy Convers. Manag.** v.108, p. 23-29, 2016.
- ABU-GHOSH, S.; DUBINSKY, Z.; VERDELHO, V.; LLUZ, D. Unconventional high-value products from microalgae: A review. **Bioresour. Technol.** v.329, p.124895, 2021.
- ACIÉN, F.G.; GÓMEZ-SERRANO, C.; MORALES-AMARAL, M.D.M.; FERNÁNDEZ-SEVILLA.; MOLINA-GRIMA, E. Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? **Appl. Microbiol. Biotechnol.** v.100(21), p. 9013-9022, 2016.
- ACIÉN, F.G.; MOLINA, E.; REIS, A.; TORZILLO, G.; ZITTELLI, G.C.; SEPÚLVEDA, C.; MASOJÍDE, C.K.J. Photobioreactors for the production of microalgae. In Microalgae-based biofuels and bioproducts. **Woodhead Publishing.** p. 1-44, 2017.
- AHMAD, I.; YUZIR, A.; MOHAMAD, S.E.; IWAMOTO, K.; ABDULLAH, N. Role of Microalgae in Sustainable Energy and Environment. In **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**). IOP Publishing. vol. 1051, No. 1, p. 012059 2021.
- ANDERSEN, R.A.; KAWACHI, M. Microalgae isolation techniques. **Algal culturing techniques.** v.83, 2005.
- AUSSANT, J.; GUIHÉNEUF, F.; STENGEL, D.B. Impact of temperature on fatty acid composition and nutritional value in eight species of microalgae. **App. Microbiol. Biotechnol.** v. 102(12), p. 5279-5297, 2018.
- BALAT, M. Potential alternatives to edible oils for biodiesel production—A review of current work. **Energy Convers. Manag.** v.52, n.2, p.1479-1492, 2011.
- BARSANTI, L.; GUALTIERI, P. Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable? **Algal Res.** v.31, p. 107-115, 2018.
- BARTEN, R.; DJOHAN, Y.; EVERS, W.; WIJFFELS, R.; BARBOSA, M. Towards industrial production of microalgae without temperature control: The effect of diel temperature fluctuations on microalgal physiology. **J. Biotechnol.** 2021.
- BECKER, E. Wolfgang. Micro-algae as a source of protein. **Biotechnol. Adv.** v. 25, n. 2, p. 207-210, 2007.
- BOROWITZA, M.A. Biology of Microalgae. **Microalgae in Health and Disease Prevention.** p.23–72, 2018
- BRASIL, B.S.A.F.; SILVA, F.C.P.; SIQUEIRA, F.G. Microalgae biorefineries: The Brazilian scenario in perspective. **New Biotechnol.** v. 39, p. 90-98, 2017.

BRENNAN, L.; FERNÁNDEZ, L.; MOSTAERT, A.S.; OWENDE, P. Enhancement of BODIPY505/515 lipid fluorescence method for applications in biofuel-directed microalgae production. **J. Microbiol. Methods.** v.90(2), p.137-143, 2012.

CAÑEDO, J.C.G.; LIZÁRRAGA, G.L.L. Considerations for photobioreactor design and operation for mass cultivation of microalgae. **Algae-Organisms for Imminent Biotechnology.** 2016.

CARVALHO, P.A.; MEIRELES, L.A.; MALCATA, F.X. Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. **Biotechnol. progress.** v. 22(6), p-1490-1506, 2006.

CHAE, S.R.; HWANG, E.J.; SHIN, H.S. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. **Bioresour. Technol.** v.97(2), p. 322-329, 2006.

CHEAH, J.; ZHU, Y.; ZHANG, Z.; YANG, W. Modification and improvement of microalgae strains for strengthening CO₂ fixation from coal-fired flue gas in power plants. **Bioresour. Technol.** v. 291, p. 121850, 2019.

CHEAH, W. Y.; SHOW, P. L.; CHANG, J-S.; LING, T. C.; JUAN, J. C. Biosequestration of atmospheric CO₂ and flue gas-containing CO₂ by microalgae. **Bioresour. Technol.** v.184, p.190-201, 2015.

CHEREGI, O.; EKENDAHL, S.; ENGELBREKTSSON, J.; STRÖMBERG, N.; GODHE, A.; SPETEA, C. Microalgae biotechnology in Nordic countries—the potential of local strains. **Physiol. Plant.** v.166(1), p. 438-450, 2019.

CHEW, K.W.; CHIA, S.R.; SHOW, P.L.; YAP, Y.J.; LING, T.C.; CHANG, J.S. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **J. Taiwan Inst. Chem. Eng.** v.91, p. 332-344, 2018.

CHEW, K.W.; YAP, J.Y.; SHOW, P.L.; SUAN, N.H.; JUAN, J.C.; LING, T.C.; CHANG, J.S. Microalgae biorefinery: high value products perspectives. **Bioresour. Technol.** v. 229, p. 53-62, 2017.

CHISTI, M. Y. Airlift bioreactors. London: Elsevier Applied Science. v.1. 1989.

CHIU, P.H.; SOONG, K.; CHEN, C.N.N. Cultivation of two thermotolerant microalgae under tropical conditions: influences of carbon sources and light duration on biomass and lutein productivity in four seasons. **Bioresour. Technol.** v.212, p. 190-198, 2016.

CHOI, H.I.; HWANG, S.W.; KIM, J.; PARK, B.; JIN, E., CHOI, I.G; SIM, S.J. Augmented CO₂ tolerance by expressing a single H⁺-pump enables microalgal valorization of industrial flue gas. **Nat. Commun.** v. 12(1), p. 1-15, 2021.

CHU, F.F.; CHU, P.N.; SHEN, X.F.; LAM, P.K.; ZENG, R.J. Effect of phosphorus on biodiesel production from *Scenedesmus obliquus* under nitrogen-deficiency stress. **Bioresour. Technol.** v.152, p. 241-246, 2014.

COLEMAN, A.M.; ABODEELY, J.M.; SKAGGS, R.L.; MOEGLEIN, W.A.; NEWBY, D.T.; VENTERIS, E.R.; WIGMOSTA, M.S. An integrated assessment of location-dependent scaling for microalgae biofuel production facilities. **Algal Res.** v.5, p. 79-94, 2014.

CONVERTI, A.; CASAZZA, A.A.; ORTIZ, E.Y.; PEREGO, P.; DEL BORGHI, M.; Converti, A. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. **Chem. Eng. Process.: Process Intensification.** v. 48(6), p. 1146-115, 2009).

CONZALEZ-CAMEJO, J.; APARICIO, S.; RUANO, M.V.; BORRÁS, L.; BARAT, R.; FERRER, J. Effect of ambient temperature variations on an indigenous microalgae-nitrifying bacteria culture dominated by *Chlorella*. **Bioresour. Technol.** v. 290, p. 121788, 2019.

CORONEL, C.D.; CURATTI, L. Climate-Simulated culturing suggests high microalgal biomass and oil productivities in most of the South American continent. **Biotechnol. Journal.**, v. 2100067, 2021.

DE MENDONÇA, H.V.; ASSEMAN, O.; ABREU, M.; COUTO, E.; MACIEL, A.M.; DUARTE, R.L.; REIS, A. Microalgae in a global world: New solutions for old problems? **Renew. Energy.** v.165, p. 842-862, 2021.

DE WINTER, L., CABANELAS, I.T.D.; ÓRFÃO, A.N.; VAESSEN, E., MARTENS, D.E.; WIJFFELS, R.H.; BARBOSA, M.J. The influence of day length on circadian rhythms of *Neochloris oleoabundans*. **Algal Res.** v. 22, p. 31-38, 2017.

DE-LUCA, R.; TRABUIO, M.; BAROLO, M.; BEZZO, F. Microalgae growth optimization in open ponds with uncertain weather data. **Compu. Chem. Eng.** v.117, p. 410-419, 2018.

DEPRÁ, M.C.; SEVERO, I.A.; DIAS, R.R.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. Photobioreactor design for microalgae culture. **In Microalgae Academic Press.** p. 35-61, 2021.

DIAS, R.R.; LASTA, P.; VENDRUSCOLO, R.G.; WAGNER, R.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. Mapping the performance of photobioreactors for microalgae cultivation. Part II: equatorial and tropical climate zone. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** v. 96(3), p. 613-621, 2021.

DOS SANTOS, A.M.; SEVERO, I.A.; QUEIROZ, M.I.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. Nutrient cycling in wastewater treatment plants by microalgae-based processes. Industrial waste: management, assessment and environmental issues. **New York: Nova Science Publishers, Inc.** v. 41-63, 2016.

DURÁN, I.; RUBIERA, F.; PEVIDA, C. Microalgae: Potential precursors of CO₂ adsorbents. **J. of CO₂ Util.** v. 26, p. 454-464, 2018.

EL-SHEEKH, M.; ABOMOHR, A.E.F.; ABD EL-AZIM, M.; ABOU-SHANAB, R. Effect of temperature on growth and fatty acids profile of the biodiesel producing microalga *Scenedesmus acutus*. **BASE.** 2017.

ESTEVEES, A.F.; SOARES, O.S.; VILAR, V.J.; PIRES, J.; GONÇALVEZ A.L. The Effect of Light Wavelength on CO₂ Capture, Biomass Production and Nutrient Uptake by Green Microalgae: A Step Forward on Process Integration and Optimisation. **Energies**. v. 13(2), p. 333, 2020.

FAKHRY, E.; M.; EL MAGHRABY, D.M. Lipid accumulation in response to nitrogen limitation and variation of temperature in *Nannochloropsis salina*. **Bot. Stud.** v. 56(1), p. 1-8, 2015.

FAY, P. The Blue-Greens (Cyanophyta-Cyanobacteria), 5th Edn. London: Edward Arnold Publishers, 88. **Studies in Biology no.** p. 160, 1983.

FIELDS, F.J.; HERNANDEZ, R.E.; WEILBACHER, E.; GARCIA-VARGAS, E.; HUYNH, J.; THURMOND, M.; MAYFIELD, S.P. Annual productivity and lipid composition of native microalgae (Chlorophyta) at a pilot production facility in Southern California. **Algal Res.** v. 56, p.102307, 2021.

FONTANILLE, P. Hydrogen generation in bioreactors. **In Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes.** p.183-208, 2020.

GLOBOBEWSWIRE. <https://www.globenewswire.com/>. Acesso em: 16 nov. 2021.

HARTMAN, L.; LAGO, R.C. Rapid preparation of fatty acid methyl esters from lipids. **Laboratory Practice.** v.22, p.475–476, 1973.

HASTENRATH, S. Climate dynamics of the tropics. **Springer Science & Business Media.** v. 8, 2012.

HEMPEL, N.; PETRICH, L.; BEHRENDT, F. Biomass productivity and productivity of fatty acids and amino acids of microalgae strains as key characteristics of suitability for biodiesel production. **J. app. Phycol.** v. 24(6), p. 1407-141, 2012.

HO, S.H.; LI, P.J.; LIU, C.C., CHANG, J.S. Bioprocess development on microalgae-based CO₂ fixation and bioethanol production using *Scenedesmus obliquus* CNW-N. **Bioresour. Technol.** v.145, p. 142-149, 2013.

JACOB-LOPES, E. The role of photoperiods on photobioreactors—A potential strategy to reduce costs. **Bioresour. Technol.** v. 219, p. 493-499, 2016.

JACOB-LOPES, E.; MARONEZE, M.M.; DEPRÁ, M.C. SARTORI, R.B.; DIAS, R.R.; ZEPKA, L.Q. Bioactive food compounds from microalgae: An innovative framework on industrial biorefineries. **Curr. Opin. Food Sci.** v. 25, p.1-7, 2019.

JACOB-LOPES, E.; SCOPARI, C.H.G.; LACERDA, L.M.C.F.; FRANCO, T.T. Effect of light cycles (night/day) on CO₂ fixation and biomass production by microalgae in photobioreactors. **Chem. Eng. Process.: Process Intensification.** v. 48(1), p. 306-310, 2009.

JOANA GIL-CHÁVEZ, G.; VILLA, J.A.; FERNANDO AYALA-ZAVALA, J.; BASILIO

HERIDA, J.; SEPULVEDA, D.; YAHIA, E.M; GONZÁLEZ-AGUILAR, G.A. Technologies for extraction and production of bioactive compounds to be used as nutraceuticals and food ingredients: an overview. **Compr. Rev. Food Sci. Food Safety**. v.12(1), p. 5-23, 2013.

KHAN, M.I.; SHIN, J.H.; KIM, J.D. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. **Microbial cell factories**. v.17(1), p. 1-21, 2018.

KHOEYI, Z.A; SEYFABADI, J.; RAMEZANPOUR, Z. Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae, *Chlorella vulgaris*. **Aquac. Int.** v. 20(1), p. 41-49, 2012.

KIM, D.Y.; VIAYAN, D.; PRAVEENKUMAR, R.; HAN, J.I., LEE, K.; PARK, J.Y.; OH, Y.K. Cell-wall disruption and lipid/astaxanthin extraction from microalgae: *Chlorella* and *Haematococcus*. **Bioresour. Technol.** v.199, p. 300-310, 2016.

KLEIN, B.C.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Integration of microalgae production with industrial biofuel facilities: A critical review. **Renew. Sust. Energ. Rev.** v. 82, p. 1376-1392, 2018.

KLYACHKO-GURVICH, G.L.; TSOGLIN, L.N.; DOUCHA, J.; KOPETSKII, J.; SHEBALINA, I.B.; SEMENENKO, V.E. Desaturation of fatty acids as an adaptive response to shifts in light intensity 1. **Physiol. Plant.** v.107(2), p. 240-249, 1999.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C., RUDOLF, B.; RUBEL, B. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. 2006.

KUMAR, L.; BHARADVAJA, N. Algal-Based Wastewater Treatment and Biorefinery. In Wastewater Treatment. **Elsevier**. p. 413-432, 2021.

LATASA, M. Pigment composition of *Heterocapsa* sp. and *Thalassiosira weissflogii* growing in batch cultures under different irradiances. **Sci. Mar.** v. 59, p.25–37, 1995.

LINDMARK, J. The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. **Waste management**. v. 34, n. 8, p. 1391-1397, 2014.

LOURENÇO, S.O. Cultivo de Microalgas Marinhas: Princípios e Aplicações. **Editora RiMa**. p. 51-60, 2006.

LU, Z.; LOFTUS, S.; SHA, J.; WANG, W.; PARK, M.S.; ZHANG, X.; HU, Q. Water reuse for sustainable microalgae cultivation: current knowledge and future directions. **Resour. Conserv. Recycl.** v. 161, p. 104975, 2020.

MARONESE, M.C.; GOERGEN, L.M.; SOUZA, R.C.L.D.; ROCHA, J.M.D; ARDENGHI, T.M. Edema and gingival bleeding in anterior region have a negative influence on quality of life of adolescents. **Braz. Oral Res.** v. 32, 2018.

MARONEZE, M.M.; SIQUEIRA, M.M; VENDRUSCOLO, R.G.; WAGNER, R.; DE

MENEZES, C.R.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. The role of photoperiods on photobioreactors—A potential strategy to reduce costs. *Bioresour. Technol.* v. 219, p. 493-499, 2016.

MATOS, J.; CARDOSO, C.; BANDARRA, N.M.; AFONSO, C. Microalgae as healthy ingredients for functional food: a review. **Food Func.** 8(8), p. 2672-2685, 2017.

MAZELLI, A.; CICCIO, A.; DI CAPRIO, F.; ALTIMARI, P.; TORO, L.; LAQUANIELLO, G.; PAGNANELLI, F. Multivariate modeling for microalgae growth in outdoor photobioreactors. **Algal Res.** v. 45, p. 101663, 2020.

MAZZELLI, A.; CICCIO, A.; FRANCESCHINI, G.; DI CAPRIO, F.; IAQUANIELLO, G.; ALTIMARI, O.; TORO, L. Investigation of effects of nutrients and external parameters on kinetic growth of outdoor microalgal cultivation. *Chem. Eng. Transac.* v.64, p.691-696, 2018.

MENDONÇA, F.; DANII-OLIVEIRA, I.M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. **Oficina de textos.** 2017.

MIRÓN, A.S. et al. Mixing in bubble column and airlift reactors. *Chem. Eng. Resear. Des.* v.82, n.10, p.1367-1374, 2004.

MOLINUEVO-SALCES, B.; RIÂNO, B.; HERNÁNDEZ, D.; CRUZ GARCÍA-GONZÁLEZ, M. Microalgae and wastewater treatment: advantages and disadvantages. In *Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment* Springer. **Singapore.** p. 505-533, 2019.

MUNOZ, R.; GUIEYSSE, B. Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. **Water research.** v. 40(15), p. 2799-2815, 2006.

NITSOS, C.; FILALI, R.; TAIDI, B.; LEMAIRE, J. Current and novel approaches to downstream processing of microalgae: A review. **Biotechnol. Adv.** v. 107650, 2020.

NWOBA, E.G.; PARLEVLIET, D.A.; LAIRD, D.W.; ALAMEH, K.; MOHEIMANI, N.R. Light management technologies for increasing algal photobioreactor efficiency. **Algal res.** v. 39, p. 101433, 2019.

PAEL, A.; MATSAKAS, L.; ROVA, U.; CRISTAKOPOULOS, P. A perspective on biotechnological applications of thermophilic microalgae and cyanobacteria. **Bioresour. Technol.** v. 278, p. 424-434, 2019.

PALADINO, O.; NEVIANI, M. Scale-up of photo-bioreactors for microalgae cultivation by π -theorem. **Biochem. Eng. J.** v.153, p. 107398, 2020.

PARSY, A.; BIDOIRE, L.; SAADOUNI, M.; BAHUAUD, M.; ELAN, T.; PÉRIÉ, F.; SAMBUSITI, C. Impact of seasonal variations on *Nannochloropsis oculata* phototrophic productivity in an outdoor pilot scale raceway. **Algal Res.** v. 58, p. 102375, 2021.

PAWLOWSKI, A.; GUZMÁN, J.L.; BERENGUEL, M.; ACIÉN, F.G. Control system for pH in raceway photobioreactors based on Wiener models. **IFAC-PapersOnLine.** v. 52(1), p.

928-933, 2019.

PEEL, M. C. B.; FINLAYSON, L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions. European Geosciences Union*. v.4 (2), pp.439-473, 2007.

PEREZ-GARCIA, O.; BASHAN, Y. Microalgal heterotrophic and mixotrophic culturing for bio-refining: from metabolic routes to techno-economics. *In Algal biorefineries*. p. 61-131, .2015.

PEROSA, A.; BORDIGNON, G.; RAVAGNAN, G.; ZINOVIEV, S. Algae as a potential source of food and energy in developing countries. Sustainability, technoloc and selected case studies, *Edizioni'ca Foscari*. 2015.

PIRES, J.C.; ALVIM-FERRAZ, M.C.; MARTINS, F.G. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: a review. *Renew Sust. Energ. Rev.*, v. 79, p. 248-254, 2017.

PRUVOST, J. Cultivation of algae in photobioreactors for biodiesel production. In *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels. Academic Press*. p. 629-659, 2019.

PRUVOST, J.; LE GOUIC, B.; LEPINE, O.; LEGRAND, J.; LE BORGNE, F. Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. *Chem. Eng. J.* v. 284, p. 850-861, 2016.

QIAO-HUI S.; JIA-WEI J.; LI-PING C.; LI-HUA C.; XIN-HUA X.; HUAN-LIN C. Effect of carbon source on biomass growth and nutrients removal of *Scenedesmus obliquus* for wastewater advanced treatment and lipid production. *Bioresour. Technol.* v.190, p.257-263, 2015.

QUEIROZ, M.I.; HORNES, M.O.; DA SILVA MANETTI.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. Fish processing wastewater as a platform of the microalgal biorefineries. *Biosyst. Eng.* v. 115(2), p. 195-202, 2013.

QUEIROZ, M.I.; MARONEZE. M.M.; MANETTI, A.G.D.S.; VIEIRA.; J.G.; ZEPKA. L.Q.; JACOB-LOPES, E. Enhanced single-cell oil production by cold shock in cyanobacterial cultures. *Ciência Rural*. v.48, 2018.

REHMAN, M.; KESHARVANI, S.; DWIVEDI, G.; SUNEJA, K.G. Impact of cultivation conditions on microalgae biomass productivity and lipid content. *Materials Today: Proceedings*. 2022.

RIPPKA, R.; DERULLES, J.; WATRERBURY, J.B.; HERDMAN, M.; STAINER, R.Y. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *J. Gen. Microbiol.* v. 111, p.1-61, 1979.

RUIZ, J.; OLIVIERI, G.; DE VREE, J.; BOSMA, R.; WILLEMS, P.; REITH, J.H.; EPPINK, M.H.; KLEINEGRIS, D.M.; WIFFELS, R.H.; BARBOSA, M.J. Towards industrial products from microalgae. *Energ. Envir. Scienc.* v. 9(10), p. 3036-43, 2016.

SARTORI, R.B.; SIQUEIRA, S.F.; MARONEZE, M.M.; FAGUNDES, M.B.; WAGNER, R.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. Microalgal secondary metabolites: effect of climatic variables, seasons, and photocycles on the biogenesis of volatile organic compounds (VOCs). **J. Appl. Phycol.** v. 33(3), p. 1457-1472, 2021.

SERIVE, B.; KAAS, R.; BÉRARD, J.B.; PASQUET, V.; PICOT, L.; CADORET, J.P. Selection and optimisation of a method for efficient metabolites extraction from microalgae. **Bioresour. Technol.** v. 124, p. 311-320, 2012.

SEVERO, I.A.; DEPRÁ, M.C.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. Carbon dioxide capture and use by microalgae in photobioreactors. In *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*. **Academic Press**. pp. 151-171, (2019).

SEYFABADI, J.; RAMEZANPOUR, Z.; KHOEYI, Z.A. Protein, fatty acid, and pigment content of *Chlorella vulgaris* under different light regimes. **J. App. Phycol.** v. 23(4), p. 721-726, 2011.

SIQUEIRA, S.F.; MARONEZE, M.M.; DIAS, R.R.; VENDRUSCULO, R.G.; WAGNER, R.; DE MENEZES, C.R.; JACOB-LOPES, E. Mapping the performance of photobioreactors for microalgae cultivation: geographic position and local climate. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** v. 95(9), p. 2411-2420, 2020.

SOLAR ELECTRICITY HANDBOOK., <<http://www.solarelectricityhandbook.com>>. Acesso em: 18. fev. 2021.

SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E.; ISAMBERT, A. Commercial applications of microalgae. **J. Bios. Bioeng.** v. 101, n. 2, p. 87-96, 2006.

SU, F.; LI, G.; FAN, Y.; YAN, Y. Enhanced performance of lipase via microcapsulation and its application in biodiesel preparation. **Sci. Rep.** v.6, p. 29670, 2016.

SUN, N.; SKAGGS, R.L.; WIGMOSTA, M.S.; COLEMAN, A.M.; HUESEMANN, M.H.; EDMUNDSON, S.J. Growth modeling to evaluate alternative cultivation strategies to enhance national microalgal biomass production. **Algal Res.** v.49, p. 101939, 2020.

SYDEY, E. B.; STURM, W.; DE CARVALHO, J.C.; THOMAZ-SACCOOL, V.; LARROCHE, C.; PANDEY, A.; SOCCOL, C. Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. **Bioresour. Technol.** v. 101(15), p. 5892-5896, 2010.

TANG, D.Y.Y.; KHOO, K.S.; CHEW, K.W.; TAO, Y.; HO, S.H.; SHOW, P.L. Potential utilization of bioproducts from microalgae for the quality enhancement of natural products. **Bioresour. Technol.** v. 304, p. 122997, 2020.

VENDRUSCOLO, R.G.; FACCHI, M.M.X.; MARONEZE, M.M.; FAGUNDES, M.B.; CICHOSKI, A.J.; ZEPKA, L.Q.; BARIN, J.S.; JACOB-LOPES, E., WAGNER, R. Polar and non-polar intracellular compounds from microalgae: Methods of simultaneous extraction, gas chromatography determination and comparative analysis. **Food Res. Inter.** V. 09, p. 204-212, 2018.

VISENTAINER, J.V. Aspectos analíticos da resposta do detector de ionização em chama para

ésteres de ácidos graxos em biodiesel e alimentos. **Química Nova**, v, 19, p. 380-385, 2012.

WANG, B.; LAN, C.Q.; HORSMAN, M. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnol. adv.* v. 30(4), p. 904-912, 2012.

WANG, H.; JI, C.; BI, S.; ZHOU, P.; CHEN, L.; LIU, T. Joint production of biodiesel and bioethanol from filamentous oleaginous microalgae *Tribonema sp.* **Bioresour. Technol.** v. 172, p. 169-173, 2014.

Wang, K., Khoo, K. S., Chew, K. W., SALVARAJOO, A.; CHEN, W.H.; CHANG, J.S.; SHOW, P.L. Microalgae: the future supply house of biohydrogen and biogas. **Front. Energy Res.** v. 9, p. 158, 2021.

Weatherbase, Travel Weather Averages, Great Falls, Virginia. <<https://www.weatherbase.com>> Acesso em: 18. fev. 2021.

WILLIAMS, P. J. L. B.; LAURENS, L. M. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. **Energ. Environ. Sci.** v. 3, n. 5, p. 554-590, 2010.

XIN, L.; HONG-YING, H.; YU-PING, Z. Growth and lipid accumulation properties of a freshwater microalga *Scenedesmus sp.* under different cultivation temperature. **Bioresour. Technol.** v. 102(3), p. 3098-3102, 2011.

YARNOLD, J.; KARAN, H.; OEY, M.; HANKAMER, B. Microalgal aquafeeds as part of a circular bioeconomy. **Trends in plant science.** v. 24(10), p. 959-970, 2019.

YEN, H.W.; HU, I.C.; CHEN, C.Y.; NAGARAJAN, D.; CHANG, J.S. Design of photobioreactors for algal cultivation. In *Biofuels from algae*. **Elsevier**. pp. 225-256, 2019.

YUAN, S.; HU, J.; LIU, Z.; HONG, Y.; WANG, X. Modeling microalgae growth in continuous culture: Parameters analysis and temperature dependence. **Energy.** v. 195, p. 116961, 2020.

ZHANG, S.; LIU, Z. Advances in the biological fixation of carbon dioxide by microalgae. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, v. 96(6), p. 1475-1495, 2021.

ZHAO, B.; SU, Y. Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: a review. **Renew. Sus. Energ. Rev.** v. 31, p. 121-132, 2014.