
Aplicação de sistemas baseados em microalgas para controle de odores em estações de tratamento de águas residuais: abordagens, avanços e perspectivas

Karem Rodrigues Vieira, Pricila Nass Pinheiro, Tatiele Casagrande do Nascimento

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1.c4>

Resumo

A emissão de compostos de odores das estações de tratamento de águas residuais tem atraído muita atenção ao longo dos anos e padrões ambientais rigorosos tem sido amplamente adotado para reduzir as emissões. Métodos de tratamento biológico de odores têm aplicações mais amplas do que as contrapartes físicas e químicas, pois são ecológicos, econômicos e geram poucos resíduos secundários. Os sistemas baseados em microalgas estão entre as abordagens mais promissoras para a prevenção ou remoção final de emissões de odores. Além disso, têm o potencial de tratar simultaneamente odores e águas residuais. No entanto, biotecnologias para este fim envolvendo microalgas ainda precisam ser discutidas sobre as características e mecanismos subjacentes do processo de desodorização. Recentemente, estudos consideráveis foram relatados para elucidar o metabolismo microalgal no controle de odores e tratamento de águas residuais. Assim, neste capítulo tópicos como metabolismo microalgal, biossíntese de compostos orgânicos voláteis, características e avanços de sistemas baseados em microalgas para tratamento de odores e aplicação de compostos voláteis de microalgas, são discutidos.

Palavras-chave: água residuária, biorreatores, cianobactéria, compostos orgânicos voláteis, poluição gasosa.

1. Introdução

A indústria alimentícia gera grande quantidade de água residuária durante os seus processos de produção e conseqüentemente gera um impacto ambiental significativo devido à descarga do efluente com alta concentração de carga orgânica nos corpos d'água, além disso são responsáveis por incômodos olfativos, gerados por diferentes processos químicos ou biológicos durante o tratamento. Os odores são formados principalmente por compostos orgânicos voláteis (COVs) como aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos, além de nitrogenados e sulfurados (SADDOUD & SAYADI, 2007; LEBRERO *et al.*, 2013; LEWKOWSKA *et al.*, 2016).

Compostos orgânicos voláteis são definidos como qualquer composto orgânico cujo ponto de ebulição está na faixa de (50-260 °C), correspondendo a pressões de vapor de saturação maiores que 102 kPa a 25 °C. Uma variedade de COVs são tóxicos, sendo a maioria proveniente de atividades antropogênicas oriundos de emissões veiculares, indústrias petroquímicas e indústrias de manufaturas (EPA 2008; BERENJIAN, CHAN & MALMIRI, 2012). A exposição humana a COVs de origem antropogênica pode resultar em um espectro de doenças que variam de leves, como irritação, a efeitos muito graves, incluindo câncer (POVEDA, 2021).

Além disso, COVs podem apresentar odores que vai do agradável ao mais intenso e fétido. O odor é certamente o mais complexo de todos os problemas de poluição do ar. A poluição por odor contribui para a formação fotoquímica de fumaça, assim como emissões secundárias de contaminantes. Portanto, é uma ameaça à qualidade do ar, à saúde e bem-estar humano (CAPELLI *et al.*, 2009; BAJPAI, 2014; LEWKOWSKA *et al.*, 2016).

Dentre os métodos utilizados para a mitigação de odor nas estações de tratamento de água residuária estão os processos de absorção, incineração, oxidação, adsorção e tratamento biológico (DOMENO *et al.*, 2010). Métodos biológicos para a remoção de odores e COVs são tecnologias econômicas quando se trata de baixas concentrações, no entanto, suas desvantagens em relação aos poluentes hidrofóbicos têm sido relatadas, além do crescimento excessivo de biofilme e desempenho instável devido às mudanças da comunidade microbiana (BURGESS, PARSONS, STUETZ, 2001; MUNÓZ *et al.*, 2015; CHENG *et al.*, 2021).

A biotecnologia de microalgas é uma área emergente da tecnologia industrial, que vem se consolidando em função da sua potencialidade de exploração. As microalgas são consideradas uma fonte potencialmente nova e valiosa de compostos biologicamente ativos (NASCIMENTO *et al.*, 2019; PINHEIRO *et al.*, 2019; JACOB-LOPES *et al.*, 2020; SEVERO *et al.*, 2020). Além disso, o uso de microalgas desempenha um papel vital na conversão de resíduos em uma infinidade de produtos, por exemplo, biocombustíveis, nutracêuticos, polímeros, pigmentos, uma variedade de produtos químicos e COVs. Microalgas também apresentam potencial em transformar gases de efeito estufa industriais, bem como águas residuais em produtos úteis, servindo assim como uma plataforma eficaz de captura e utilização de carbono (WANG *et al.*, 2017; JACOB-LOPES *et al.*, 2020).

Por fim, uma inovação tecnológica atual é o uso de microalgas na mitigação de odores liberados de água residuária (VIEIRA *et al.*, 2019; 2021). Assim, este capítulo aborda os tópicos referentes ao metabolismo microalgal, produção de COVs por microalgas, mecanismos de desodorização de água residuária, além do potencial de aplicação de COVs de microalgas.

2. Microalgas e seu metabolismo

Microalgas são um grupo de microrganismos fotossintéticos tipicamente unicelulares, eucarióticos ou procarióticos. Desenvolvem-se principalmente em ambientes aquáticos, solos, rochas, e em ambientes extremos, como geleiras e fossas termais, podendo estar associados simbioticamente a outros organismos auxiliando-os na fixação de nitrogênio (HERRERO, MURO-PASTOR, FLORES, 2001; LOURENÇO, 2006; SANTOS *et al.*, 2017).

A diversidade metabólicas destes microrganismos podem explicar sua capacidade em responder rapidamente a alterações no meio onde vivem (ACHYUTHAN *et al.*, 2017). A diversidade deste grupo de microrganismos é destacada por serem responsáveis pela estruturação da atmosfera terrestre, por sua importância ecológica e econômica, sendo que as algas são as maiores removedoras de carbono da biosfera (MOORE, 2001).

Metabolicamente, as espécies de microalgas têm três vias de fixação de carbono: (i) fotoautotrófica, (ii) heterotrófica ou (iii) mixotrófica (PEREZ-GARCIA, & BASHAN, 2015; SANTOS *et al.*, 2016a). Destes, a via fotoautotrófica é a

principal rota energética dos microrganismos relacionados (SUGANYA *et al.*, 2016; SEVERO *et al.*, 2019). Este mecanismo envolve o uso de carbono inorgânico (CO_2) ou íons bicarbonato HCO_3^- dissolvido em meio aquoso (de acordo com pH: CO_2 (pH <5); HCO_3^- (7 <pH <9)) como fonte de carbono na presença de luz, principalmente regulado por carbono do metabolismo fotossintético e mecanismos de concentração (KONG, 2021).

Em geral, o metabolismo fotossintético do carbono microalgal ocorre através do ciclo Calvin-Benson-Bassham. Portanto, as microalgas usam energia luminosa para gerar equivalentes redutores e fixar CO_2 em moléculas orgânicas (por meio das reações dependentes e independentes de luz) (CALVIN & BENSON, 1948; SEVERO *et al.*, 2019; SU, 2021). O ciclo de Calvin é composto por 13 etapas catalisadas por cerca de 11 enzimas diferentes e subdivididas em 3 reações: (i) carboxilação, (ii) redução e (iii) regeneração (NOREÑA-CARO & BENTON, 2018; SEVERO *et al.*, 2020).

Como alternativa à condição de baixa concentração de CO_2 viabilizando a fotossíntese, a maioria das microalgas tem diferentes mecanismos de concentração de CO_2 : como assimilação de íons HCO_3^- por meio de transportadores ativos na membrana plasmática; e usando a enzima anidrase carbônica extracelular para conversão aumentada de HCO_3^- em CO_2 intracelular (NOREÑA-CARO & BENTON, 2018).

Por outro lado, algumas espécies de microalgas também podem crescer heterotroficamente na ausência de luz, suportadas por uma fonte de carbono exógena. No metabolismo heterotrófico, o substrato é convertido em glicose 6-fosfato para que possa iniciar a via oxidativa da pentose fosfato. Durante o metabolismo, ocorre a formação de duas moléculas de ATP (trifosfato de adenosina). O produto final, assim como no cultivo fotossintético, também é o piruvato (SANTOS *et al.*, 2016b; PINHEIRO *et al.*, 2019).

Além disso, algumas espécies de microalgas são mixotróficas e podem causar fototrofia e heterotrofia simultaneamente. Isso porque, o CO_2 é fixado pela fotossíntese, enquanto os substratos orgânicos são assimilados pela respiração aeróbia (PEREZ-GARCIA & BASHAN, 2015; PINHEIRO *et al.*, 2019).

3. Mecanismos de formação de compostos orgânicos voláteis em microalgas

Carbono exógenos são metabolizados a piruvato ou acetil-CoA. Além disso, as vias biossintéticas e metabólicas das microalgas podem converter esses substratos em COVs como terpenos, álcoois, cetonas, aldeídos, ésteres, hidrocarbonetos, ácidos carboxílicos e compostos sulfurados. Em geral, a produção desses compostos é alcançada por meio das vias de 2-cetoácidos, isoprenóides e derivados de ácidos graxos (ZARGAR *et al.*, 2017; JACOB-LOPES *et al.*, 2020; SEVERO *et al.*, 2020; VIEIRA, PINHEIRO & ZEPKA, 2020) como apresentada na Figura 1.

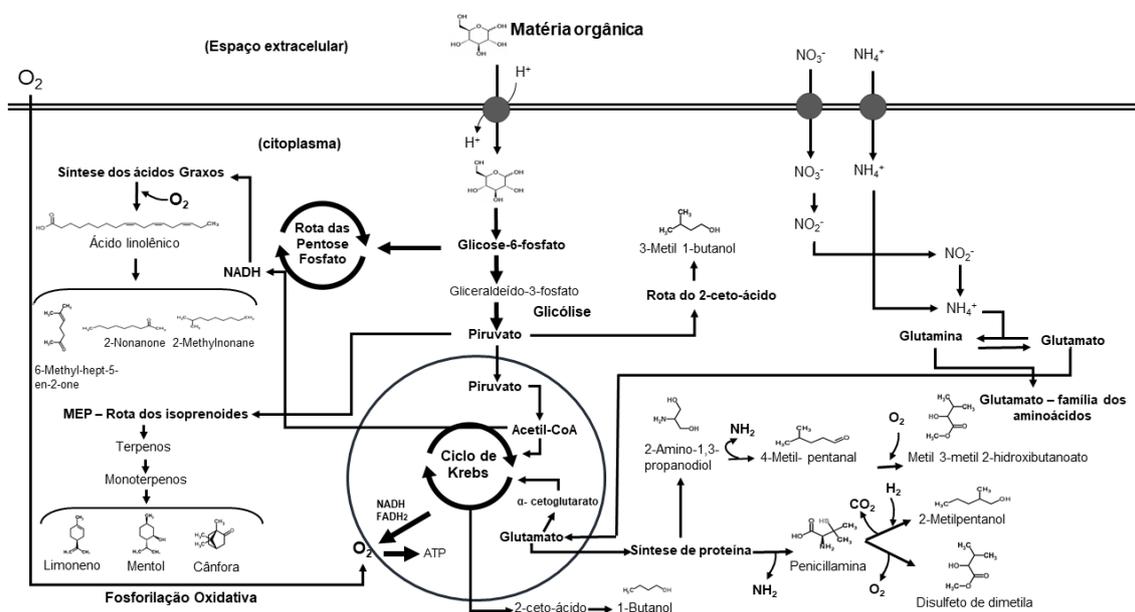


Figura 1. Rota metabólica de formação de compostos orgânicos voláteis por microalgas.

A via dos 2-cetoácidos é uma rota importante para a obtenção de compostos voláteis de diferentes classes químicas, como aldeídos, álcoois, ésteres e ácidos carboxílicos. Esta via envolve reações bioquímicas sequenciais, como extensão, descarboxilação, isomerização, redução, desidratação e esterificação de alguns aminoácidos de cadeia ramificada tais como, leucina e valina. Os compostos 1-butanol, 3-metil-butanol e 2-metil-butanol são reduzidos a 3-metil-butanol e 2-metil-butanol, além disso a reação pode ser estendida para

formar 1-hexanol e outros álcoois (LIAO, PONTRELLI & LUO, 2016; VIEIRA, PINHEIRO & ZEPKA, 2020).

A via dos ácidos graxos começa com acetil-CoA usando malonil-CoA como bloco de construção, com base em uma série de reações cíclicas catalisadas pelo sistema multienzimático, denominado ácido graxo sintase. Compostos orgânicos voláteis como cetonas, aldeídos, hidrocarbonetos e álcoois podem ser produzidos a partir da degradação de ácidos graxos (SANTOS *et al.*, 2016a; ZHOU, KERKHOVEN & NIELSEN, 2018). Cetonas estruturalmente diversificadas são produtos metabólicos de ácidos graxos precursores (PINHEIRO *et al.*, 2019; VIEIRA, PINHEIRO & ZEPKA, 2020). Exemplos recentes incluem a produção de 2-heptanona e 2-nonanona a partir da oxidação do ácido linoléico (HAN *et al.*, 2020).

Os aldeídos produzidos pela via dos ácidos graxos são aldeídos C6 e C9 que podem ser rapidamente metabolizados em álcoois por meio da enzima desidrogenase. Por exemplo, os ácidos graxos linoléico e ácido linolênico são conhecidos por serem precursores biossintéticos para 2,4-decadienal, 2-heptanol, 2-octenal e 1-hexanal, que podem ser subsequentemente reduzidos a álcoois como 1-hexanol (BRAVO-LAMAS *et al.*, 2018; JERKOVIĆ *et al.*, 2018; PINHEIRO *et al.*, 2019; VIEIRA, PINHEIRO & ZEPKA, 2020).

A conversão do ácido graxo em hidrocarboneto ocorre usando aldeídos como substratos. Pelo menos duas enzimas, redutase de proteína transportadora acil-acil e oxigenase deformiladora de aldeído, são responsáveis por catalisar a reação (PINHEIRO *et al.*, 2019; VIEIRA, PINHEIRO & ZEPKA, 2020; BASRI *et al.*, 2020).

Até o momento, três vias diferentes foram relatadas para sintetizar os isoprenóides: o ácido mevalônico (MVA); fosfato de metileritritol (MEP); e MVA modificado. No entanto, para espécies de microalgas, apenas as vias MVA / MEP foram descritas, ou ambas as vias em combinação (PINHEIRO *et al.*, 2019; VIEIRA, PINHEIRO & ZEPKA, 2020).

O isopentenil difosfato e o dimetilalil difosfato são os intermediários centrais do mecanismo dos isoprenóides. Em sequência, essas estruturas iniciais são transformadas em geranil difosfato seguido de farnesil difosfato (MEENA *et al.* 2017; PINHEIRO *et al.*, 2019). Posteriormente, esses precursores de carbono são convertidos em terpenóides diversificados, por meio de uma

série de reações catalisadas por três enzimas distintas: geranyl difosfato sintase, farnesil difosfato sintase e geranylgeranyl difosfato sintase, respectivamente. Finalmente, os carotenóides e seus produtos de clivagem oxidativa e enzimática são formados, como β -ionona e 6-metil-5-hepten-2-ona (DUDAREVA *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2016b).

Além disso, através do geranyl difosfato como substrato de partida, são produzidos a geosmina e o 2-metilisoborneol (2-MIB) (Figura 2), no qual foram amplamente estudados devido a indesejáveis manifestações de sabor e odor. A síntese de 2-metilisoborneol, inicia com a metilação do precursor geranyl difosfato em 2-metilgeranyl difosfato que é ciclizado em 2-MIB (LEE *et al.*, 2017). Em microalgas, a ciclização de farnesil difosfato pode formar geosmina, catalisada pela geosmina sintase por meio de três etapas (farnesil difosfato para germacradienol, germacradienol para 8,10-dimetil-1-octalina e 8,10-dimetil-1-octalina para geosmina) (DURME *et al.*, 2013; MEENA *et al.*, 2017; LIATO & AÏDER, 2017).

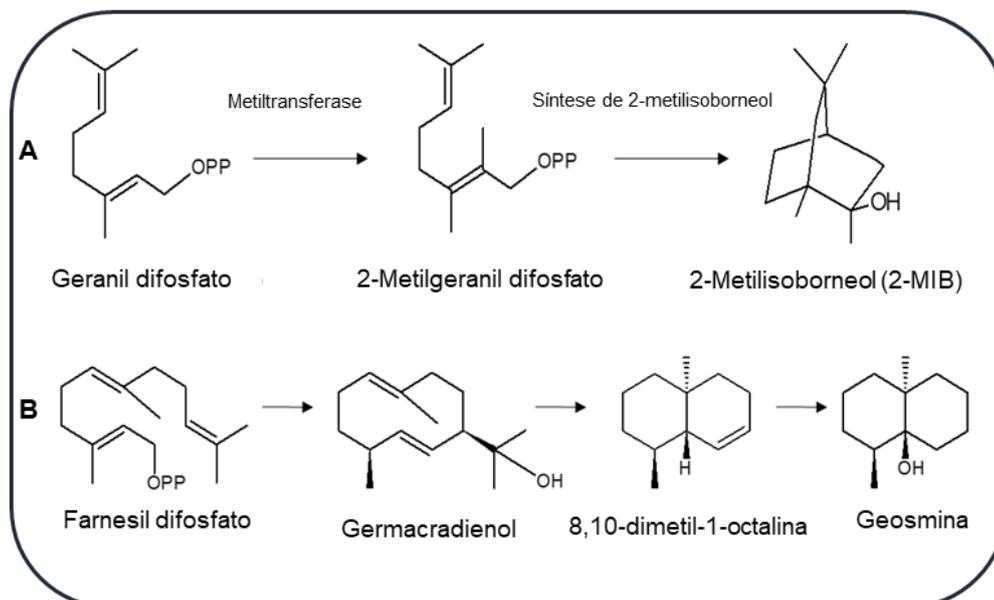


Figura 2. Mecanismo de formação de 2-MIB (A) e Geosmina (B).

As microalgas também liberam compostos de enxofre, como dimetilsulfeto, dimetildissulfeto e dimetiltrissulfeto, sendo que o sulfeto volátil mais importante produzido é dimetilsulfeto (WATSON & JÜTTNER, 2017; ACHYUTHAN *et al.*, 2017). Esses compostos podem ser derivados de

aminoácidos, como a metionina, formando dimetilsulfoniopropionato (GIORDANO, M., & PRIORETTI, 2014). A partir da desmetilação do dimetilsulfoniopropionato, ele forma metanotiol que pode ser convertido em dimetilsulfeto por metilação (CURSON *et al.*, 2017; ACHYUTHAN *et al.*, 2017).

Os compostos de odor desejáveis e indesejáveis estão presente no meio ambiente, decorrentes de processos naturais e artificiais, pela geração de COVs (JACOB-LOPES & FRANCO, 2013). Considerando a biossíntese de COVs pelas microalgas, embora dependente da espécie, sua produção pode ser modificada por vários fatores bióticos e abióticos, como fase de crescimento, estresses (temperatura, intensidade de luz, pH, salinidade), nutrientes, gases (H₂O, CO₂, O₃), aeração (mistura / turbulência) ou cultura estática (DURME *et al.*, 2013; FRANCISCO *et al.*, 2014; ACHYUTHAN *et al.*, 2017). Assim, condições de cultivo controladas, podem influenciar na biotransformação, metabolização ou remoção de compostos voláteis do meio ambiente (VIEIRA *et al.*, 2021).

4. Desodorização de água residuária a partir de microalgas

Microalgas, são consideradas como potenciais biocatalisadores para aplicação em processos biológicos de tratamento de água residuária industrial. Além disso, os sistemas de tratamento de efluentes empregando microalgas apresentam-se ambientalmente favoráveis com um carácter sustentável, uma vez que não geram poluentes adicionais, fornecendo oportunidades de reciclagem de nutrientes e conversão de resíduos orgânicos em uma infinidade de produtos, como, biocombustíveis, nutracêuticos, polímeros, pigmentos e variedades de produtos químicos biologicamente ativos para aplicações em diversos setores da biotecnologia (FRANCISCO *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2016a; WANG *et al.*, 2017; LAURITANO *et al.*, 2018).

Além disso, pesquisas atuais demonstraram a capacidade de microalgas em desodorizar água residuária de indústria frigorífica (VIEIRA *et al.*, 2019; 2021). Águas residuais liberam uma variedade de grupos de poluentes atmosféricos que podem ser gerados em cada etapa do tratamento da água residual, causando a formação de precursores de compostos odoríferos com diferentes limiar de percepção (LEBRERO *et al.*, 2013; LEWKOWSKA *et al.*, 2016). A Tabela 1 apresenta compostos orgânicos voláteis detectados em água residuária da indústria de processamento de carnes.

Tabela 1. Compostos de odor de água residuária.

Compostos	Fórmula química	LP ^a (µg.m ⁻³)	Descritor do odor ^a
dissulfeto de carbono	CS ₂	3×10 ²	desagradável, pútrido
dimetil sulfeto	C ₂ H ₆ S	2×10 ⁴	repolho, sulfuroso
2-propenal	C ₃ H ₄ O	7×10 ²	queimado
2-metilfurano	C ₅ H ₆ O	3.5×10 ³	carne assada
Butanal	C ₄ H ₈ O	1.5×10 ⁴	doce
2-metilbutanais	C ₅ H ₁₀ O	1×10 ³	amêndoa
3-metilbutanais	C ₅ H ₁₀ O	2×10 ²	malte, óleo
Tolueno	C ₇ H ₈	5.95×10 ⁵	naftalina
dissulfeto dimetil	C ₂ H ₆ S ₂	3.5×10 ³	repolho podre, putrefação
Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	2×10 ²	grama, gordura
1,4-cineole	C ₁₀ H ₁₈ O	Na ^b	especiaria
Limoneno	C ₁₀ H ₁₆	1.7×10 ³	limão
1,8-cineole	C ₁₀ H ₁₈ O	1.3×10 ³	especiaria
1 pentanol	C ₅ H ₁₂ O	5×10 ²	frutado
α-terpineno	C ₁₀ H ₁₆	na	limão
p-cimeno	C ₁₀ H ₁₄	7.1×10 ³	limão, frutado, combustível
ciclohexanona	C ₆ H ₁₀ O	3×10 ²	pimenta, acetona
2-heptanol	C ₇ H ₁₆ O	1×10 ⁵	erva
pirrolidina-2,4-diona	C ₄ H ₅ NO ₂	na	na
Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	1×10 ¹	flor, verde
dimetil trissulfide	C ₂ H ₆ S ₃	1×10 ²	podre
1-heptanol	C ₇ H ₁₆ O	2.5×10 ⁶	verde
3-propilciclopenteno	C ₈ H ₁₄	na	na
benzaldeído	C ₇ H ₆ O	1×10 ¹	queimado
Linalol	C ₁₀ H ₁₈ O	1.4×10 ²	flor
Fenchol	C ₁₀ H ₁₈ O	5×10 ⁴	cânfora
4-terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	3.4×10 ⁻¹	mofo
2-octen-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	5×10 ⁴	sabão, plástico
1-nonanol	C ₉ H ₂₀ O	5×10 ¹	gordura
fenilacetaldéido	C ₈ H ₈ O	4×10 ³	mel
acetofenona	C ₈ H ₈ O	6.5×10 ⁻¹	mofo, flor
limonen-4-ol	C ₁₀ H ₁₆ O	na	menta fresca
α-terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	2.5×10 ⁵	óleo, hortelã
álcool benzílico	C ₇ H ₈ O	2×10 ⁸	doce, flor
2-feniletanol	C ₈ H ₁₀ O	8.6×10 ⁴	flor
o-cresol	C ₇ H ₈ O	2×10 ¹	medicinal, fenólico
Fenol	C ₆ H ₆ O	2×10 ⁴	borracha, medicinal
p-cresol	C ₇ H ₈ O	2×10 ¹	sintético, fenol
Indol	C ₈ H ₇ N	3×10 ⁻¹	fecal
Escatol	C ₉ H ₉ N	5.6×10 ⁻⁴	fecal

^aLimiar de percepção^bna: não avaliadoAdaptado de Vieira *et al.*, 2019.

Estes COVs podem liberar uma variedade de odores que vai do agradável ao mais intenso e fétido. Assim, muitas são as tecnologias de redução de odor e são comumente classificadas em técnicas físicas, químicas e biológicas (ALFONSIN *et al.*, 2015). A Norma Europeia 12255-9 (2002), recomenda a oxidação biológica, a oxidação química, a adsorção e oxidação térmica. No entanto, os métodos físicos e químicos de purificação de compostos de odor, apesar de comprovarem sua eficiência e confiabilidade e continuarem a ocupar seu nicho, ainda existem diversas desvantagens. Entre eles o alto custo de investimento e operação, além da possível geração de fluxos secundários de resíduos (BAJPAI, 2014; ALFONSIN *et al.*, 2015).

Em contrapartida, os sistemas de tratamento biológico de odores utilizam processos bioquímicos para decompor compostos odoríferos. Estes métodos possuem a vantagem de converter os poluentes em produtos de oxidação como por exemplo, dióxido de carbono, água etc. São métodos de baixo custo, com simplicidade operacional e são considerados "tecnologias limpas", pois reduzem ou eliminam a necessidade de tratamento adicional dos produtos finais (BURGESS, PARSONS & STUETZ, 2001; BAJPAI, 2014; CHENG *et al.*, 2021).

Os métodos biológicos têm um amplo espectro de aplicações. São considerados os sistemas mais competitivos para a desodorização de poluentes do ar caracterizados por altas taxas de fluxo e baixas concentrações de contaminantes (SADDOUD & SAYADI, 2007; VIKRANT *et al.*, 2017). Além disso, o tratamento biológico é ambientalmente seguro, pois não produz compostos tóxicos prejudiciais à saúde ou ao meio ambiente. Geralmente é operado em condições naturais (temperatura e pressão atmosféricas normais).

Estes métodos para o tratamento de COVs incluem biofiltros, bioscrubbers (bio-lavador), biorreatores de membrana e filtros de *biotrickling* (filtro biológico percolador). Nestes métodos, os poluentes são degradados biologicamente por microrganismos aeróbios (VIKRANT *et al.*, 2017). No entanto, estas tecnologias apesar de serem consideradas amigas da natureza, apresentam desvantagens como quedas excessivas de pressão, acúmulo gradual de subprodutos ácidos, dificuldade em controlar os parâmetros biológicos de operação, entupimento devido ao acúmulo de grande quantidade de biofilme e redução da eficiência do tratamento em altas concentrações de

poluentes, além do alto custo de investimento (LEWKOWSKA *et al.*, 2016; VIKRANT *et al.*, 2017).

Assim, novas tecnologias de redução de odor têm sido amplamente investigadas como alternativas economicamente eficientes e confiáveis para a mitigação dos odores. Pesquisas utilizando bioprocessos baseados em microalgas demonstra ser uma tecnologia inovadora para desodorização de água residuária em estações de tratamento por ser uma alternativa econômica e ecologicamente correta, cuja flexibilidade metabólica é uma vantagem, pois converte moléculas polares e apolares de efluentes (VIEIRA *et al.*, 2019; JACOB-LOPES *et al.*, 2020).

Bioprocessos baseado em microalgas no tratamento de controle de COVs desagradáveis encontrados em água residuária de processamento de aves e suínos, apresentaram uma eficiência de remoção de 99,6% (VIEIRA *et al.*, 2019). No entanto, ao ser realizado análise olfatométrica os pesquisadores constataram que não foi percebido nenhum descritor de odor desagradável após o período de 72 horas de tempo de residência celular, no qual concluíram que 100% dos compostos voláteis desagradáveis foram removidos da água residuária (VIEIRA *et al.*, 2021).

Tecnologias de tratamento de odores em estações de tratamento de água residuária demonstraram que a eficiência de remoção de odores variou entre 70 a 95% (LEBRERO *et al.*, 2013). Pesquisas também mostraram uma eficiência de remoção de 99,7% da emissão de odores de águas residuárias de suínos com o uso de células microbianas, no entanto o tempo de residência total foi de 260 horas (LOGAN *et al.*, 2008). Assim, é possível perceber a capacidade do biorreator heterotrófico microalgal em mitigar os odores mais desagradáveis do efluente do processamento de carnes em um curto período de tempo.

As tecnologias atuais de controle de odor, ainda apresentam problemas para remover o indol e o escatol, ambos COVs são considerados um dos principais marcadores de odor de instalações de tratamento de água residuária do abate e processamento animal. Além disso, estes compostos estão presentes simultaneamente dos componentes estruturais hidrofóbicos e hidrofílicos (MATIAS *et al.*, 2015; LEWKOWSKA *et al.*, 2016). As microalgas apresentaram a capacidade em mitigar odores como indol e escatol, além da remoção de compostos hidrofóbicos, como terpenos e poluentes atmosféricos perigosos,

como dissulfeto de carbono, acroleína, tolueno, acetofenona, o-cresol, fenol e p-cresol (EPA, 2008; VIEIRA *et al.*, 2021).

Sistemas baseados em microalgas como uma tecnologia de tratamento de odor superam as desvantagens encontradas nas tecnologias já existentes. A tecnologia que utiliza microalgas, apesar de apresentar um alto custo inicial de implantação, não apresenta problemas de processo significativos. Além do mais, biorreatores microalgais podem ser utilizados em conjuntos com outras etapas de processo, como conversão de matéria orgânica e nutrientes da água residuária em uma infinidade de bioprodutos, reduzindo assim o custo de processo (SANTOS *et al.*, 2016a; WANG *et al.*, 2017; LAURITANO *et al.*, 2018; DEPRÁ *et al.*, 2019).

Apesar de estudos relatarem que as microalgas podem produzir compostos desagradáveis, como a presença de 2-MIB e geosmina (MEENA *et al.*, 2017; LEE *et al.*, 2017; LIATO & AÏDER, 2017), estes compostos não foram detectados em pesquisas realizadas com a microalga *Phormidium autumnale* (SANTOS *et al.*, 2016a; VIEIRA *et al.*, 2019; 2021). Sabe-se que estes compostos podem ser facilmente liberados por muitas microalgas devido a fatores biótico e abióticos, no entanto, o uso de biorreatores facilitam o controle de temperatura e pH, além do tempo de residência celular.

Vieira *et al.* (2021), demonstraram que sistemas baseados em microalgas além de biodegradar compostos de odor desagradável da água residuária, também conseguiu biotransformar e produzir novos compostos voláteis, maximizando o aproveitamento da biomassa microalgal, ao mesmo tempo que se reduz o impacto ambiental gerado por estes resíduos. Pesquisas com relação a COVs gerados por microalgas tem sido realizado atualmente, e estas apresentam um amplo espectro de classes de voláteis, podendo ser utilizadas como aromas, aditivos alimentares ou na geração de energia (SANTOS *et al.*, 2016b; VIEIRA, PINHEIRO & ZEPKA, 2020).

5. Aplicação industrial de compostos orgânicos voláteis de microalgas

As microalgas produzem uma variedade de COVs que podem ser aplicados como uma importante fonte alternativa de produtos químicos a granel e finos. Os compostos propanol, butanol, 3-metil-butanol, hexanol, hexanal, β -ciclocitral e β -ionona produzidos por microalgas possuem um apelo comercial

(SANTOS *et al.*, 2016b). Estes compostos de aromas gerados por microalgas podem competir com fontes tradicionais. A elucidação das vias metabólicas e precursores e a aplicação da bioengenharia convencional resultou em um conjunto de mais de 100 aromas químicos derivados da biotecnologia (BERGER, 2009).

O mercado global de compostos aromáticos deve atingir US\$ 8,2 bilhões em 2027, sendo os terpenos a classe de compostos predominante neste mercado (GLOBAL AROMA CHEMICALS MARKET, 2021). Outras classes também de grande interesse são os álcoois e os aldeídos, sendo importantes componentes do aroma amplamente aplicados em cosméticos, perfumaria e indústrias alimentícias (SANTOS *et al.*, 2016b; PINHEIRO *et al.*, 2019).

A identificação detalhada de tais compostos é muito importante devido aos seus impactos diretos nas propriedades aromáticas do produto final enriquecido com biomassa de microalgas (SANTOS *et al.*, 2016a; ROBERTSON *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2017). Segundo Hosoglu (2018), compostos identificados como sendo responsáveis por tais características aromáticas são diferenciados em categorias tais como hidrocarbonetos, aldeídos, álcoois, ésteres, cetonas, e enxofre. Tabela 2 apresenta compostos voláteis detectado em microalgas.

Tabela 2. Compostos voláteis detectados em diferentes espécies de microalgas.

Compostos voláteis	Microalgas
Terpenos	
α -ionona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloopsis</i>
β -ciclocitral	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Nostoc</i> sp., <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Spirulina platensis</i> , <i>Tetraselmis chuii</i>
β -ionona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloopsis</i> , <i>Spirulina platensis</i> , <i>Nostoc</i> sp.
geosmina	<i>Anabaena lemmermannii</i> , <i>Anabaena circinalis</i> , <i>Anabaena solitaria</i> , <i>Anabaena viguieri</i> , <i>Aphanizomenon gracile</i> , <i>Geitlerinema splendidum</i> , <i>Leibleinia subtilis</i> , <i>Microcoleus</i> sp., <i>Phormidium allorgei</i> , <i>Phormidium amoenum</i> , <i>Phormidium breve</i> , <i>Phormidium cortianum</i> , <i>Phormidium formosum</i> , <i>Phormidium simplicissimum</i> <i>Phormidium</i> sp.

2-metilisoborneol	<i>Oscillatoria curviceps</i> , <i>Oscillatoria limosa</i> , <i>Oscillatoria tenuis</i> , <i>Oscillatoria variabilis</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Phormidium breve</i> , <i>Phormidium calcícola</i> , <i>Phormidium favosum</i> , <i>Phormidium tenue</i> , <i>Phormidium sp.</i>
geraniol	<i>Synechococcus</i>
mentol	<i>Phormidium autumnale</i>
citronelol	<i>Oocystis pusilla</i>
linalol	<i>Chlorella sp.</i> , <i>Chlamydomonas sp.</i> , <i>Oocystis pusilla</i>

Aldeídos

Benzaldeído	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas sp.</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i> .
Heptanal	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas sp.</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Dicrateria inornata</i>
Hexanal	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas sp.</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Phormidium</i> <i>autumnale</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i>
2-metilpropanal	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chaetoceros</i> <i>calcitrans</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
3-metilbutanal	<i>Rhodomonas sp.</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Phormidium autumnale</i>
nonanal	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas sp.</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> , <i>Cryptocodinium cohnii</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i> , <i>Chlorella</i> <i>prothecoides</i>
2,6-nonadienal	<i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Thalassiosira</i> <i>weissflogii</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> , <i>Nannochloropsis sp.</i> , <i>Dicrateria inornata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i>
2-octenal	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Thalassiosira</i> <i>weissflogii</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Dicrateria inornata</i>
2-pentenal	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas sp.</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
acetaldeído	<i>Phormidium autumnale</i>

Sulfurados

benzotiazol	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros</i> <i>calcitrans</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> , <i>Nannochloropsis sp.</i> , <i>Dicrateria inornata</i>
dissulfeto dimetil	<i>Rhodomonas sp.</i> , <i>Tetraselmis chuii</i>
dimetil sulfeto	<i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Chlorella protothecoides</i> , <i>Chlorella</i> <i>vulgaris</i> , <i>Cryptocodinium cohnii</i> , <i>Nannochloropsis sp.</i> ,

	<i>Oscillatoria chalybea</i> , <i>Oscillatoria tenuis</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Plectonema boryanum</i> , <i>Synechococcus cedrorum</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i>
dimetil trissulfide	<i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i>
Álcool	
Benzil álcool	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Crypthecodinium cohnii</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i> , <i>Chlorella prothecoides</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
cis-2-penten-1-ol	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
Etanol	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
1-hexanol	<i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Phormidium autumnale</i>
3-hexen-1-ol	<i>Chlorella vulgaris</i>
2-etil-1-hexanol	<i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Spirulina platensis</i> , <i>Nostoc</i> sp.
ciclohexanol	<i>Phormidium autumnale</i>
isobutanol	<i>Phormidium autumnale</i>
2-metilbutanol	<i>Tetraselmis</i> sp.; <i>Nannochloropsis</i> , <i>Chlorella vulgaris</i>
3-metilbutanol	<i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Phormidium autumnale</i>
1-octen-3-ol	<i>Rhodomonas</i> sp., <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Crypthecodinium cohnii</i> , <i>Chlorella prothecoides</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i>
2-feniletil álcool	<i>Crypthecodinium cohnii</i>
1-pentanol	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
1-penten-3-ol	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia Closterium</i> , <i>Phormidium autumnale</i>
2-metil-1-pentanol	<i>Phormidium autumnale</i>
Hidrocarbonetos	
2,4-dimetilheptano	<i>Scenedesmus obliquus</i>
dodecano	<i>Microcystis flos-aquae</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>
heptadecano	<i>Spirulina platensis</i> , <i>Nostoc</i> sp., <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> ,

	<i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Dicrateria inornata</i> , <i>Microcystis flos-aquae</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>
hexadecano	<i>Spirulina platensis</i> , <i>Nostoc</i> sp., <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> , <i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Dicrateria inornata</i> , <i>Microcystis flos-aquae</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>
pentadecano	<i>Spirulina platensis</i> , <i>Nostoc</i> sp., <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> , <i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Dicrateria inornata</i>
tetradecano	<i>Spirulina platensis</i> , <i>Nostoc</i> sp., <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Thalassiosira weissflogii</i> , <i>Platymonas helgolandica</i> , <i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Dicrateria inornata</i> , <i>Microcystis flos-aquae</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>
tridecano	<i>Microcystis flos-aquae</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>
Furanos	
2-etilfurano	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
2-pentilfurano	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
Cetonas	
3-hidroxi-2-butanona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
acetil valeril	<i>Phormidium autumnale</i>
2,3-butanediona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
2-heptanona	<i>Phormidium autumnale</i>
6-metil-5-hepten-2-ona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis</i> , <i>Phormidium autumnale</i> .
2-octanediona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
2-nonanona	<i>Phormidium autumnale</i>
3,5-octadien-2-ona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Dicrateria inornata</i> , <i>Platymonas helgolandica</i>
2-propanona	<i>Scenedesmus obliquus</i>
2,3-pentenediona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i>
1-penten-3-ona	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Chaetoceros calcitrans</i> , <i>Dicrateria inornata</i> , <i>Platymonas helgolandica</i>

Ésteres

metil octanoato	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis</i> sp., <i>Nannochloopsis</i> , <i>Cryptocodinium cohnii</i> , <i>Chlorella prothecoides</i> , <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i>
metil 3-metil 2- hidroxibutanoato	<i>Phormidium autumnale</i>
metil penilacetato	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Rhodomonas</i> sp., <i>Tetraselmis chuii</i> , <i>Nannochloopsis</i> , <i>Cryptocodinium cohnii</i> , <i>Chlorella prothecoides</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i>
2-metoxi-2- metilpropano	<i>Scenedesmus obliquus</i>

Adaptado de Vieira, Pinheiro, Zepka *et al.*, (2020).

A utilização da fração volátil da biomassa de microalgas pode representar uma melhoria na oferta para diferentes tipos de indústria. As microalgas são bem conhecidas pela capacidade de produção futura de biodiesel por apresentarem alta produtividade, biossíntese lipídica eficiente e praticamente não competem com as terras agricultáveis para a produção de alimentos (JACOB-LOPES *et al.*, 2019). Também possuem robustez para capturar gases de efeito estufa, principalmente o CO₂ atmosférico, e se bioconverter em múltiplos bioprodutos. Esses excedentes provavelmente estarão disponíveis a um custo mínimo ou nenhum custo, o que favorece a abordagem da biorrefinaria de microalgas (DEPRÁ *et al.*, 2018).

Os compostos orgânicos voláteis são considerados bioprodutos gasosos do metabolismo microalgal, podendo ser recuperados na forma de gases de exaustão. Esses sistemas podem produzir COVs com potencial energético. O potencial de energia dos COVs produzidos no biorreator heterotrófico pode variar de $3,48 \times 10^9$ a $8,67 \times 10^9$ MJ kg⁻¹, totalizando conteúdo de energia de $1,22 \times 10^{13}$ MJ kg⁻¹. Além disso, a taxa de geração de energia pode chegar a $1,01 \times 10^{12}$ MJ. m⁻³. d⁻¹ sob essas condições de cultivo (SEVERO *et al.*, 2019; JACOB-LOPES *et al.*, 2020).

Considerando as estruturas químicas deste compostos, alguns álcoois apresentaram potencial energético comparável ao da gasolina (SANTOS *et al.*, 2016b; PINHEIRO *et al.*, 2019). Além disso, Halfmann, Gu e Zhou (2014), demonstraram que os compostos terpênicos possuem características atrativas

como biodiesel e querosene de aviação. Da mesma forma, os hidrocarbonetos voláteis fornecem características de combustão desejáveis. Os aldeídos e cetonas podem ser considerados compostos intermediários de álcoois e hidrocarbonetos (MEENA *et al.*, 2017; ACHYUTHAN *et al.*, 2017).

6. Conclusão

Sistemas baseados em microalgas podem ser amplamente considerados como uma solução para resolver os diversos desafios da humanidade em relação aos problemas ambientais. As microalgas já são conhecidas por apresentarem potencial no processo de recuperação de efluentes, reduzindo o uso de energia de estratégias de gerenciamento de resíduos e regenerar nutrientes incluindo carbono, fósforo e nitrogênio. Além disso, apresentam a capacidade de desodorizar água residuária, e simultaneamente produzir uma variedade de compostos voláteis de interesse comercial. A integração deste tipo de processo pode abordar as questões de sustentabilidade energética e reciclagem de resíduos no âmbito da bioeconomia circular, reduzindo os custos de produção de microalgas, aumentando a eficiência e a rentabilidade do processo. Embora o futuro para aplicações de sistemas baseados em microalgas pareça promissor, ainda há um longo caminho a ser percorrido para que se torne uma parte importante da indústria moderna.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica PROCAD/ CAPES, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

8. Referências

- ACHYUTHAN, K. E., HARPER, J. C., MANGINELL, R. P., MOORMAN, M. W. Volatile metabolites emission by in vivo microalgae-an overlooked opportunity? **Metabolites**, v.7, p.3, 2017. <https://doi.org/10.3390/metabo7030039>.
- ALFONSÍN, C., LEBRERO, R., ESTRADA, J. M., MUNÓZ, R., KRAAKMAN, N.J.R., FEIJOO, G., MOREIRA, M.T. Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: a guideline based on life cycle assessment.

Journal of Environmental Management, v.149, p.77–84, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.011>.

BAJPAI, P. **Removal of Odours**, in: **Springer Briefs in Environmental Science**, Biological Odour Treatment, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07539-6>.

BASRI, R.S., ZALIHA, R.N., RAHMAN, R.A., KAMARUDIN, N.H.A., ALI, M.S.M. Cyanobacterial aldehyde deformylating oxygenase: Structure, function, and potential in biofuels production. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.164, p.3155-3162, 2020.

BERENJIAN, A., CHAN, N., & MALMIRI, H.J. Volatile organic compounds removal methods: a review. **Journal Biochemistry, Biotechnology**, v.8, p.220-229, 2012. <https://doi.org/10.3844/ajbbbsp.2012.220.229>.

BERGER, R.G. Biotechnology of flavours – the next generation. **Biotechnology Letters**, v.31, p.1651-1659, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10529-009-0083-5>.

BRAVO-LAMAS, L., BARRON, L.J., FARMER, L., ALDAI, N. Fatty acid composition of intramuscular fat and odour-active compounds of lamb commercialized in northern chromatography with mass spectrometry. **Journal Chromatography A**, v.1350, p.92-101, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.02.006>.

BURGESS, J.E., PARSONS, S.A. & STUETZ, R.M. Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review. **Biotechnology Advances**. v.19, p.35-63, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00058-6).

CALVIN, M., & BENSON, A.A. The path of carbon in photosynthesis. **Science**, v.107, p.476-480, 1948. <https://doi.org/10.1126/science.107.2784.476>.

CAPELLI, L., SIRONI, S., DEL ROSSO, R., CÉNTOLA, P. Predicting odour emissions from wastewater treatment plants by means of odour emission factors. **Water Research**, v.43, p.1977-1985, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.01.022>.

CHENG, H.H., LU, I.C., HUANG, P.W., WU, Y.J.; WHANG, L.M. Biological treatment of volatile organic compounds (VOCs)-containing wastewaters from

wet scrubbers in semiconductor industry. **Chemosphere**, v.282, p.131137, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131137>.

CURSON, A. R. J., LIU, J., BERMEJO MARTÍNEZ, A., GREEN, R. T., CHAN, Y., CARRIÓN, O., WILLIAMS B. T., ZHANG, S. H., YANG, G. P., BULMAN PAGE, P. C., ZHANG, X. H., & TODD, J. D. Dimethylsulfoniopropionate biosynthesis in marine bacteria and identification of the key gene in this process. **Nature Microbiology**, v.2, 2017. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.9>.

DEPRÁ, M.C., SANTOS, A.M., SEVERO, I.A., SANTOS, A.B., ZEPKA, L.Q., JACOB-LOPES, E. Microalgal biorefineries for bioenergy production: can we move from concept to industrial reality? **BioEnergy Research**, v.11, p.727-747, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9934-z>.

DEPRÁ, M.C.; MÉRIDA, L.G.R.; MENEZES, C.R.; ZEPKA, L.Q.; JACOB-LOPES, E. A new hybrid photobioreactor design for microalgae culture. **Chemical Engineering Research and Design**, v.144, p.1-10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.01.023>.

DOMENO, C., RODRÍGUEZ-LAFUENTE, A., MARTOS, J.M., BILBAO, R., NERÍN, C. VOC removal and deodorization of effluent gases from an industrial plant by photooxidation, chemical oxidation, and ozonization. **Environment Science & Technology**, v..44, p.2585-2591, 2010. <https://doi.org/10.1021/es902735g>.

DUDAREVA, N., KLEMPIEN, A., MUHLEMANN, J.K., KAPLAN, I. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. **New Phytologist**, v.198, p.16-32, 2013. <https://doi.org/10.1111/nph.12145>.

DURME, J.V., GOIRIS, K., DE WINNE, A., DE COOMAN, L., MUYLAERT, K. Evaluation of the volatile composition and sensory properties of five species of microalgae. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.61, p.10881-10890, 2013. <https://doi.org/10.1021/jf403112k>.

EN 12255-9:2002. European Standard on Wastewater treatment plants – Part 9: **Odour control and ventilation**. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, January, 2002.

FRANCISCO, É. C., FRANCO, T. T., WAGNER, R., & JACOB-LOPES, E. Assessment of different carbohydrates as exogenous carbon source in cultivation of cyanobacteria. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v.37, p.1497-1505, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1121-1>.

GIORDANO, M., & PRIORETTI, L. **Sulphur and algae: metabolism, ecology and evolution**. In: Borowitzka MA, Beardall J, Raven JA (eds) Microalgal physiology. Springer, Dordrecht, p.185-209, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_9.

GLOBAL AROMA CHEMICALS MARKET (2021 to 2026) - Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecasts. July 02, 2021 08:33 ET | Source: Research and Markets, acessado em Agosto de 2021. <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/07/02/2257148/28124/en/Global-Aroma-Chemicals-Market-2021-to-2026-Industry-Trends-Share-Size-Growth-Opportunity-and-Forecasts.html>.

HALFMANN, C., GU, L., & ZHOU, R. Engineering cyanobacteria for the production of a cyclic hydrocarbon fuel from CO₂ and H₂O. **Green Chemistry**, v.16, p.3175-3185, 2014. <https://doi.org/10.1039/c3gc42591f>.

HAN, G., ZHANG, L., LI, Q., WANG, Y., CHEN, Q., KONG, B. Impacts of different altitudes and natural drying times on lipolysis, lipid oxidation and flavour profile of traditional Tibetan yak jerky. **Meat Science**, v.162, p.108030, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108030>.

HERRERO, A., MURO-PASTOR, A. M., FLORES, E. Nitrogen control in cyanobacteria. **Journal of bacteriology**, v.183, p.411-425, 2001. <https://doi.org/10.1128/JB.183.2.411-425.2001>.

HOSOGLU, M. I. Aroma characterization of five microalgae species using solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry. **Food Chemistry**, v.240, p.1210-1218, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.052>.

JACOB-LOPES, E., & FRANCO, T. T. From oil refinery to microalgal biorefinery. **Journal of CO₂ Utilization**, v.2, p.1-7, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2013.06.001>.

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. **Current Opinion in Food Science**. In Press. v.25, p.1-7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.12.003>.

JACOB-LOPES, E., SANTOS, A. B., SEVERO, I. A., DEPRÁ, M. C., MARONEZE, M. M., & ZEPKA, L. Q. Dual production of bioenergy in heterotrophic cultures of cyanobacteria: Process performance, carbon balance, biofuel quality and sustainability metrics. **Biomass and Bioenergy**, 142, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105756>.

JERKOVIĆ, I., MARIJANOVIĆ, Z., ROJE, M., KÚS, P.M., JOKIĆ, S., ČOŽ-RAKOVAC, R. Phytochemical study of the headspace volatile organic compounds of fresh algae and seagrass from the Adriatic Sea (single point collection). **Plos One**. v.13, p.1-13, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196462>.

KONG, W., SHEN, B., LYU, H., KONG, J., MA, J., WANG, Z., FENG, S. Review on carbon dioxide fixation coupled with nutrients removal from wastewater by microalgae. **Journal of Cleaner Production**, v.292, p.125975, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125975>.

LAURITANO, C., MARTIN, J., CRUZ, M., REYES, F., ROMANO, G., LANORA, A. First identification of marine diatoms with anti-tuberculosis activity. **Science Reports**, v.8, p.1-10, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20611-x>.

LEBRERO, R., VOLCKAERT, D., PÉREZ, R., MUNÓZ R., VAN LANGENHOVE, H. A membrane bioreactor for the simultaneous treatment of acetone, toluene, limonene and hexane at trace level concentrations. **Water Research**, v.47, 2199-2212, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.041>.

LEE, J., RAI, P.K., JEON, Y.J., KIM, K.H., KWON, E.E. The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water. **Environmental Pollution**, v.227, p.252-262, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.058>.

LEWKOWSKA, P., CIEŚLIK, B., DYMERSKI, T., KONIECZKA, P., & NAMIEŚNIK, J. Characteristics of odors emitted from municipal wastewater treatment plant and methods for their identification and deodorization techniques.

Environmental Research, 151, 573-586, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.030>.

LIAO, J. C., MI, L., PONTRELLI, S., & LUO, S. Fuelling the future: Microbial engineering for the production of sustainable biofuels. **Nature Reviews Microbiology**, 14(5), 288-304, 2016. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.32>.

LIATO, V., & AÏDER, M. Geosmin as a source of the earthy-musty smell in fruits, vegetables and water: Origins, impact on foods and water, and review of the removing techniques. **Chemosphere**, v.181, p.9-18, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.039>.

LOGAN, B.E., D. CALL, D., S. CHENG, S., HAMELERS, H.V.M., SLEUTELS, A.W. JEREMIASSE, T.H.J.A., ROZENDAL, R.A. Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. **Environmental Science Technology**, v.42, p.8630-8640, 2008. <https://doi.org/10.1021/es801553z>.

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

MATIAS, T., MARQUES, J., QUINA, M.J., GANDO-FERREIRA, L., VALENTE, A.J.M., PORTUGAL, A., DURÃES, L. Silica-based aerogels as adsorbents for phenol-derivative compounds. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.480, p.260-269, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.01.074>.

MEENA, S., KUMAR, S.R., DWIVEDI, V., KUMAR SINGH, A.K., CHANOTIYA, C.S., AKHTAR, Q., KUMAR, K., SHASANY, A.K., NAGEGOWDA, D.A. Transcriptomic insight into terpenoid and carbazole alkaloid biosynthesis, and functional characterization of two terpene synthases in curry tree (*Murraya koenigii*). **Science Reports**, v.7, p.44126, 2017.
<https://doi.org/10.1038/srep44126>.

MOORE, J.P. (Ed.), **Volatile organic compounds: occurrence, behavior and ecological implications**, ed. Nova Science Publishers, New York, pp. 1-18, 2001.

MUÑOZ, R., MALHAUTIER, L., FANLO, J.L., QUIJANO, G. Biological technologies for the treatment of atmospheric pollutants. **International Journal**

Environmental Analytical Chemistry, v.95, p.950-967, 2015.
<https://doi.org/10.1080/03067319.2015.1055471>.

NASCIMENTO, T.C.; CAZARIN, C.B.B., MARÓSTICA JR, M.R.; RISSO, E.M.; AMAYA-FARFAN, J.; GRIMALDI, R.; MERCADANTE, A.Z.; JACOB-LOPES, E., ZEPKA, L.Q. Microalgae biomass intake positively modulates serum lipid profile and antioxidant status. **Journal of Functional Foods**, v.58, p. 11-20, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.04.047>.

NOREÑA-CARO, D & BENTON, M.G. Cyanobacteria as photoautotrophic biofactories of high-value chemicals. **Journal of CO₂ Utilization**, v.28, p.335-366, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.10.008>.

PEREZ-GARCIA, & BASHAN. **Algal biorefineries: Volume 2: Products and refinery design**. In *Algal Biorefineries: Volume 2: Products and Refinery Design*, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6>.

PINHEIRO, P. N., VIEIRA, K. R., SANTOS, A. B., JACOB-LOPES, E., ZEPKA, L. Q. **Biogenesis of Volatile Organic Compounds in Microalgae-Based Systems**. In: Gokare A. Ravishankar and Ranga Rao Ambati. (Org.). *Handbook of Algal Technologies and Phytochemicals - Food, Health and Nutraceutical Applications*. 1ed. Boca Raton: CRC Press, 2019, v. 1, p. 100-110.

POVEDA, J. Beneficial effects of microbial volatile organic compounds (MVOCs). **Applied Soil Ecology**, v.168, p.104118, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104118>.

ROBERTSON, R.C.; MATEO, M.R.G.; O'GRADY, M.N.; GUIHENEUF, F.; STENGEL, D.B.; ROSS, R.P.; FITZGERALD, G.F.; KERRY, J.P.; STANTON, C. An assessment of the techno-functional and sensory properties of yoghurt fortified with a lipid extract from the microalga *Pavlova lutheri* Innovative. **Food Science and Emerging Technologies**, v.37, p.237-246, 2016.

SADDOUD, A., & SAYADI, S. Application of acidogenic fixed-bed reactor prior to anaerobic membrane bioreactor for sustainable slaughterhouse wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v.149, p.700-706, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.031>.

SANTOS, A. B., FERNANDES, A. S., WAGNER, R., JACOB-LOPES, E., ZEPKA, L. Q. Biogenesis of volatile organic compounds produced by *Phormidium autumnale* in heterotrophic bioreactor. **Journal of Applied Phycology**. v.28, p.1561-1570, 2016a. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0740-0>.

SANTOS, A.B., VIEIRA, K.R., NOGARA, G.P., WAGNER, R., JACOB-LOPES, E., ZEPKA, L.Q. **Biogenesis of Volatile Organic Compounds by Microalgae/cyanobacteria: Occurrence, Behavior, Ecological Implications and Industrial Applications**. In: Moore, J. P. (Org.). Volatile Organic Compounds: Occurrence, Behavior and Ecological Implications. 1ed.: Nova Science Publishers. New York. Current Biotechnology, v.4, p.249-254, 2016b.

SANTOS, A.M., SANTOS, A. M., SARTORI, R.B., QUEIROZ, L. Z., BARIN, J. S., JACOB-LOPES, E., Nutrient cycling in meat processing industry by microalgae/cyanobacteria-based processes. **Desalination and Water Treatment**. v.100, p.91-99, 2017. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21719>.

SEVERO, I.A., DEPRÁ, M.C., DIAS, R.R., JACOB-LOPES, E. **Process integration applied to microalgae-based systems**. Handbook of Microalgae-Based Processes and Products, v.1, p.709-735, 2020. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818536-0.00026-9>.

SEVERO, I.A., PINHEIRO, P.N., VIEIRA, K.R., ZEPKA, L.Q., JACOB-LOPES, E. **Biological conversion of carbon dioxide into volatile organic compounds**. In: Inamuddin *et al.* (Eds.), Conversion of carbon dioxide into hydrocarbons: v.2, ed. Springer, Cham, p. 45-73, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28638-5_2.

SEVERO, I.A., SIQUEIRA, S.F., DEPRÁ, M.C., MARONEZE, M.M., ZEPKA, L.Q., JACOB-LOPES, E. Biodiesel facilities: What can we address to make biorefineries commercially competitive? **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.112, p.686-705, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.020>.

SU, Y. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v.762, p.144590, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144590>.

SUGANYA, T., VARMAN, M., MASJUKI, H.H., RENGANATHAN, S. Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with

biofuels production: A biorefinery approach. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v.55, p.909-941, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.026>.

US EPA, **Initial List of Hazardous Air Pollutants with Modifications**, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 2008.

VIEIRA, K. R., PINHEIRO, P. N. & ZEPKA, L. Q. **Volatile organic compounds from microalgae**. In Handbook of Microalgae-Based Processes and Products. Elsevier Inc. 2020. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818536-0.00024-5>.

VIEIRA, K. R., PINHEIRO, P. N., SANTOS, A. B., CICHOSKI, A. J., MENEZES, C. R., WAGNER, R., ZEPKA, L. Q., & JACOB-LOPES, E. The role of microalgae-based systems in the dynamics of odors compounds in the meat processing industry. **Desalination and Water Treatment**. v.150, p.282-292, 2019. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23730>.

VIEIRA, K.R., MARONEZE, M.M., KLEIN, B., WAGNER, R., QUEIROZ, M.I., JACOB-LOPES, E., ZEPKA, L.Q., The role of microalgae-based systems in the dynamics of odorous compounds in the meat processing industry. Part II - Olfactometry and sensory relevance. **Desalination and Water Treatment**. v.232, p.16-25, 2021. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27458>.

VIKRANT, K., KIM, K. H., SZULEJKO, J. E., PANDEY, S. K., SINGH, R. S., GIRI, B. S., BROWN, R. J. C., & LEE, S. H. Bio-filters for the treatment of VOCs and odors - a review. **Asian Journal of Atmospheric Environment**, v.11, p.139-152, 2017. <https://doi.org/10.5572/ajae.2017.11.3.139>.

WANG, X., BAO, K., CAO, W., ZHAO, Y., HU, W.C. Screening of microalgae for integral biogas slurry nutrient removal and biogas upgrading by different microalgae cultivation technology. **Scientific Reports**, v.7, p.1-12, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05841-9>.

WANG, X., BAO, K., CAO, W., ZHAO, Y., HU, W.C. Screening of microalgae for integral biogas slurry nutrient removal and biogas upgrading by different microalgae cultivation technology. **Science Reports**, v.7, p.1-12, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05841-9>.

WATSON, S. B., & JÜTTNER, F. Malodorous volatile organic sulfur compounds: Sources, sinks and significance in inland waters. **Critical Reviews in**

Microbiology, v.43, p.210-237, 2017.
<https://doi.org/10.1080/1040841X.2016.1198306>.

ZARGAR, A., BAILEY, C.B., HAUSHALTER, R.W., EIBEN, C.B., KATZ, L., KEASLING, J.D. Leveraging microbial biosynthetic pathways for the generation of 'drop-in' biofuels. **Current Opinion in Biotechnology**, v.45, p.156-63, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.03.004>.

ZHOU, L., CHEN, J., XU, J., LI, Y., ZHOU, C., YAN, X. Change of volatile components in six microalgae with different growth phases. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.97, p.761-769, 2017.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.7794>.

ZHOU, Y. J., KERKHOVEN, E. J., & NIELSEN, J. Barriers and opportunities in bio-based production of hydrocarbons. **Nature Energy**, v.3, p.925-935, 2018.
<https://doi.org/10.1038/s41560-018-0197-x>.

Autores

Karem Rodrigues Vieira*, Pricila Nass Pinheiro, Tatiele Casagrande do Nascimento

Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

* Autor para correspondência: merakvieira@gmail.com