

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BAMBUÍ  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Jasmim Lopes Cordeiro

**PROTEÍNA UNICELULAR SUSTENTÁVEL PRODUZIDA POR BACTÉRIAS:  
uma revisão da literatura**

BambuÍ  
2022

JASMIM LOPES CORDEIRO

**PROTEÍNA UNICELULAR SUSTENTÁVEL PRODUZIDA POR BACTÉRIAS:  
uma revisão da literatura**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Bambuí, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Marcos Rogério Vieira Cardoso.

Co-orientadora: Laura Yumi Suemitsu.

Bambuí

2022

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

C794p Cordeiro, Jasmim Lopes.  
Proteína unicelular sustentável produzida por bactérias: uma revisão da literatura. / Jasmim Lopes Cordeiro. – 2022.  
33 f.; il.: color.

Orientador: Marcos Rogerio Vieira Cardoso.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Bacharelado em Engenharia de Alimentos, 2022.

1. Microorganismos. 2. Fermentação de precisão. 3. Proteína microbiana. I. Cardoso, Marcos Rogerio Vieira. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. III. Título.

CDD 579

Elaborada por Douglas Bernardes de Castro- CRB-6/2802

Jasmim Lopes Cordeiro

**PROTEÍNA UNICELULAR SUSTENTÁVEL PRODUZIDA POR BACTÉRIAS:**  
uma revisão da literatura

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Bambuí* – MG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Aprovado em: 25/08/2022 pela banca examinadora:

*Marcos Rogério Vieira Cardoso*

---

Prof. Dr. Marcos Rogério Vieira Cardoso- IFMG Bambuí (Orientador Professor IFMG Bambuí)

*Laura Yumi Suemitsu*

---

MSc. Laura Yumi Suemitsu - UNICAMP (Co-orientadora)

*Kamilla Soares de Mendonça*

---

Prof. Dra. Kamilla Soares de Mendonça - IFMG Bambuí (Professora IFMG Bambuí)

*Gaby Patricia Terán Ortiz*

---

Prof. Dra. Gaby Patricia Terán Ortiz - IFMG Bambuí (Professora IFMG Bambuí)

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial a Laura, por me nortear com tanto carinho e dedicação. Ao Marcos Rogério, por ter aceitado esse desafio, mesmo dispondo de pouco tempo. Aos meus amigos de faculdade, por terem sido meu grupo de apoio e exemplo de cumplicidade. A toda a minha família e amigos, pela torcida e incentivo. Estou muito feliz em finalizar essa etapa.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

Simone de Beauvoir

## RESUMO

Pesquisas mostram que a agricultura e a pecuária têm impacto significativo no meio ambiente, podendo se tornar insustentáveis com o aumento da população mundial, levando ao esgotamento de recursos naturais e a mudanças climáticas. Esse cenário desencadeou a busca por alternativas de proteínas mais sustentáveis, e o uso de microrganismos vem ganhando destaque na pesquisa de novas formas de produção de proteínas. O objetivo deste estudo foi obter informações sobre esse processo, realizando uma revisão da literatura para melhor compreender a utilização de microrganismos para produção de proteínas microbianas ou unicelulares. A presente revisão bibliográfica baseou-se no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews* (PRISMA), as palavras-chave utilizadas foram “*microbial protein*” e “*single-cell protein*”, junto ao operador booleano AND e a palavra “food”, para limitar a pesquisa à área de alimentos. Os temas encontrados foram sobre produção de proteína microbiana, processos de fermentação de precisão, microrganismos e captura de carbono para produção de proteína microbiana. A produção da proteína unicelular inicia-se a partir da fabricação da massa celular, utilizando microrganismos cultivados em resíduos agrícolas e/ou industriais. A produção dessa biomassa consiste em um processo de fermentação submersa ou em estado sólido. Proteínas unicelulares produzidas utilizando hidrogênio e energia solar desempenham um papel importante na produção de proteínas com menores emissões de gases de efeito estufa e uso da terra, tendo menor impacto nos ecossistemas e contribuindo para a preservação do meio ambiente, da fauna e da flora mundial do que proteínas tradicionais, como carne bovina e alguns vegetais.

**Palavras-chave:** Microrganismos. Fermentação de precisão. Proteína microbiana. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Research shows that agriculture and livestock have a significant impact on the environment and could become unsustainable as the world population increases, leading to depletion of natural resources and climate change. This scenario triggered the search for more sustainable protein alternatives, and the use of microorganisms has been gaining prominence in the research of new forms of protein production. The objective of this study was to obtain information about this process, performing a literature review to better understand the use of microorganisms for the production of microbial or unicellular proteins. The present literature review was based on the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews (PRISMA) method, the keywords used were “microbial protein” and “single-cell protein”, together with the Boolean operator AND and the word “food”, for limit the search to the food area. The topics found were about microbial protein production, precision fermentation processes, microorganisms and carbon capture for microbial protein production. The production of the unicellular protein starts from the manufacture of the cell mass, using microorganisms grown in agricultural and/or industrial residues. The production of this biomass consists of a submerged or solid state fermentation process. Single-celled proteins produced using hydrogen and solar energy play an important role in the production of proteins with lower greenhouse gas emissions and land use, having less impact on ecosystems and contributing to the preservation of the environment, fauna and flora of the world, than traditional proteins such as beef and some vegetables.

**Keywords:** Microorganisms. Precision fermentation. Microbial protein. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Uso global da terra para agricultura em diferentes dietas.....	13
Figura 2 - Uso da terra por quilo de produto alimentício. ....	14
Figura 3 - Eficiência energética da produção de carnes e laticínios.....	14
Figura 4 - Áreas de florestas e de vegetação natural destruídas pela humanidade nos últimos anos. ....	15
Figura 5 - Bases de dados eletrônicas utilizadas no presente trabalho. ....	17
Figura 6 - Representação esquemática da metodologia utilizada para identificação, seleção, elegibilidade e inclusão dos artigos científicos.....	19
Figura 7 - Fluxograma e limites do sistema de produção de proteína microbiana. ....	23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões de gases de efeito estufa na produção de alimentos de origem animal.....	12
Tabela 2 - Comparação entre algas, fungos e bactérias.....	25

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Emissões de gases estufa</i></b> .....	<b>11</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Contaminação da água</i></b> .....	<b>12</b>
<b>1.1.3</b>	<b><i>Uso da terra</i></b> .....	<b>13</b>
<b>1.1.4</b>	<b><i>Extinção de biodiversidade</i></b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Bases de dados bibliográficos</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Estratégia de busca, seleção e avaliação dos estudos</b> .....	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Busca e seleção de artigos</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Proteína unicelular</b> .....	<b>19</b>
<b>4.3</b>	<b>Fermentação de precisão</b> .....	<b>21</b>
<b>4.4</b>	<b>Aplicações e legislação</b> .....	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>29</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

De acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura), em 2050, teremos 9,1 bilhões de pessoas no mundo, sendo necessária uma produção de alimentos 70% maior do que a atual para suprir a população mundial. Apesar dos avanços tecnológicos e da produção industrial de alimentos, as preocupações relacionadas à segurança alimentar ainda permanecem. Estudos vêm demonstrando que a agricultura e a pecuária causam grandes impactos para o meio ambiente, configurando um sistema insustentável que pode contribuir para o esgotamento de recursos hídricos e mudanças climáticas (POORE e NEMECK, 2018). Muitos desses impactos gerados pela pecuária têm sido relacionados ao alto consumo de carne (SAXENA, 2011).

Essas consequências, atreladas a questões éticas relacionadas ao consumo de produtos de origem animal e maior preocupação do consumidor com a saúde, têm resultado no crescimento da demanda por produtos *plant-based*, ou seja, à base de plantas (KUMAR, 2017). Segundo uma pesquisa realizada pelo *The Good Food Institute* (GFI), para entender a evolução do mercado de proteínas alternativas no Brasil, 50% dos participantes estão reduzindo seu consumo de carne. Contudo, para que um produto análogo chegue ao consumidor, é preciso que ele seja acessível e que atenda às expectativas deste, o que configura um grande desafio para a indústria alimentícia. Em razão disso, são necessárias novas alternativas para produzir alimentos e, principalmente, fontes de proteína de forma sustentável (GFI, 2020).

Dentre as novas alternativas estudadas para produção de uma proteína, destaca-se a utilização de microrganismos (PIKAAR et al., 2018; SILLMAN et al., 2020), pois esse processo de produção de proteínas tem grande potencial, levando em conta que o produto obtido possui alta qualidade nutricional, contendo todos os aminoácidos essenciais em teores adequados para a dieta humana e, também, o fato de ser produzido de forma mais sustentável em comparação com outras proteínas de origem vegetal e as de origem animal (MATASSA et al., 2016).

Empresas que produzem alimentos a partir de biomassa microbiana estão surgindo no mercado. Um exemplo disso é a *startup* finlandesa *Solar Foods*, que

utiliza microrganismos e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) como fonte de carbono para a fabricação de ingredientes ricos em proteína com a marca *Solein (Food out of thin air...*, 2021). A produção da proteína unicelular é realizada pelo processo de fermentação em biorreatores fechados e automatizados causando, assim, o mínimo de impacto ambiental e com uma pegada de carbono negativa (SILLMAN et al., 2020). Tal pegada negativa do processo se dá pela captação do CO<sub>2</sub> da atmosfera. De forma similar, a principal fonte de energia para o crescimento bacteriano, o H<sub>2</sub>, é produzido pela eletrólise da água, utilizando-se energia renovável (SILLMAN et al, 2020). Desse modo, o processo torna-se viável em qualquer localização geográfica, já que independe de condições climáticas e de solo adequados (SILLMAN et al., 2020). Como resultado, são reduzidas eficientemente as emissões de gases de efeito estufa, assim como o desmatamento, a perda de biodiversidade e o uso da terra (PIKAAR et al., 2017).

#### **1.1.1 Emissões de gases estufa**

As emissões de gases de efeito estufa que são geradas na produção de carnes de origem animal variam de acordo com a espécie criada. A carne bovina é uma das principais fontes de gases estufa, devido ao gás metano produzido pela digestão dos ruminantes (GODFRAY, 2019). Na Tabela 1, são apresentadas as emissões de gases de efeito estufa em toda a cadeia produtiva de diferentes tipos de alimentos de origem animal.

Tabela 1 - Emissões de gases de efeito estufa na produção de alimentos de origem animal.

<b>Alimentos</b>	<b>Mudança de uso da terra (kgCO<sub>2</sub>eq por kg)</b>	<b>Fazenda (kgCO<sub>2</sub>eq por kg)</b>	<b>Alimentação animal (kgCO<sub>2</sub>eq por kg)</b>
Carne bovina (rebanho)	16,3	39,4	1,9
Cordeiro e carneiro	0,5	19,5	2,4
Queijo	4,5	13,1	2,3
Carne bovina (rebanho leiteiro)	0,9	15,7	2,5
Camarões (cativeiro)	0,2	8,4	2,5
Carne de porco	1,5	1,7	2,9
Carne de aves	2,5	0,7	1,8
Peixe (cativeiro)	0,5	3,6	0,8
Ovos	0,7	1,3	2,2
Leite	0,5	1,5	0,2

Fonte: Adaptado de RITCHIE, ROSER e ROSADO, 2020.

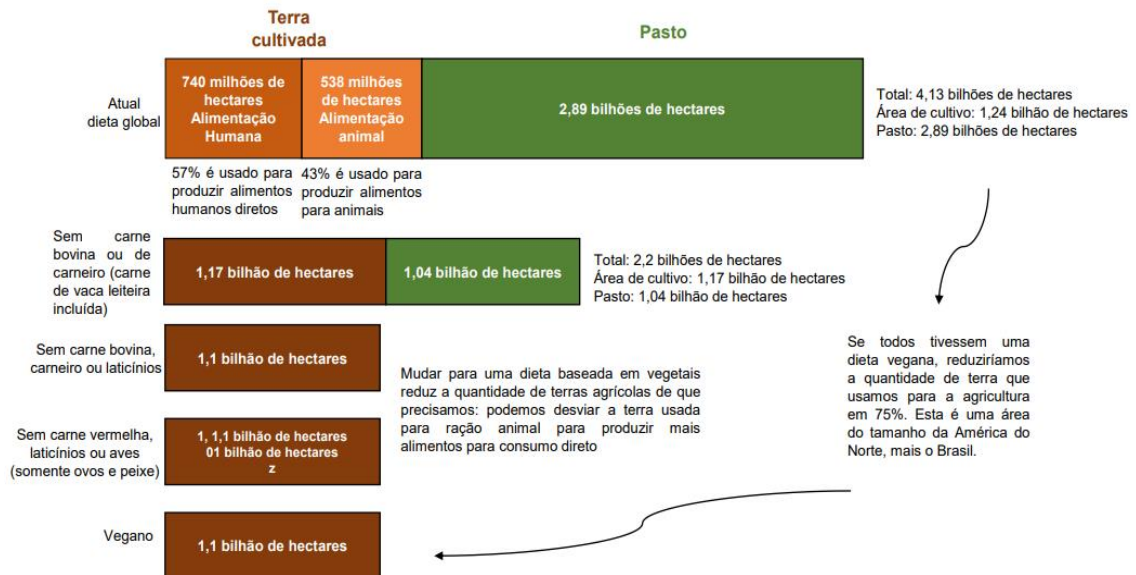
### **1.1.2 Contaminação da água**

De forma análoga, os resíduos da produção de alimentos de origem animal se tornaram um problema considerável: 7 bilhões de animais bovinos geram 1,4 bilhões de toneladas de resíduos nos Estados Unidos, o que equivale a 5 toneladas de resíduos por cidadão americano (SABATE, 2014). Esses resíduos, em sua maioria, não são tratados e contêm altas concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio e antibióticos, que podem contaminar alimentos e fontes de água, sendo uma ameaça para a saúde da população (SABATE, 2014).

### 1.1.3 Uso da terra

De acordo com a figura 1, se houver a mudança para uma dieta mais baseada em vegetais, terá um menor uso da terra. Vê-se a quantidade de terras agrícolas que o mundo precisaria para fornecer alimentos para todos. Se todos tivessem uma dieta vegana, seria reduzida a quantidade de terra que usada para a agricultura em 75%. Esta é uma área do tamanho da América do Norte, mais o Brasil. Mudar para uma dieta baseada em vegetais reduz a quantidade de terras agrícolas necessárias: pode-se desviar a terra usada para ração animal para produzir mais alimentos para consumo direto.

Figura 1 - Uso global da terra para agricultura em diferentes dietas.



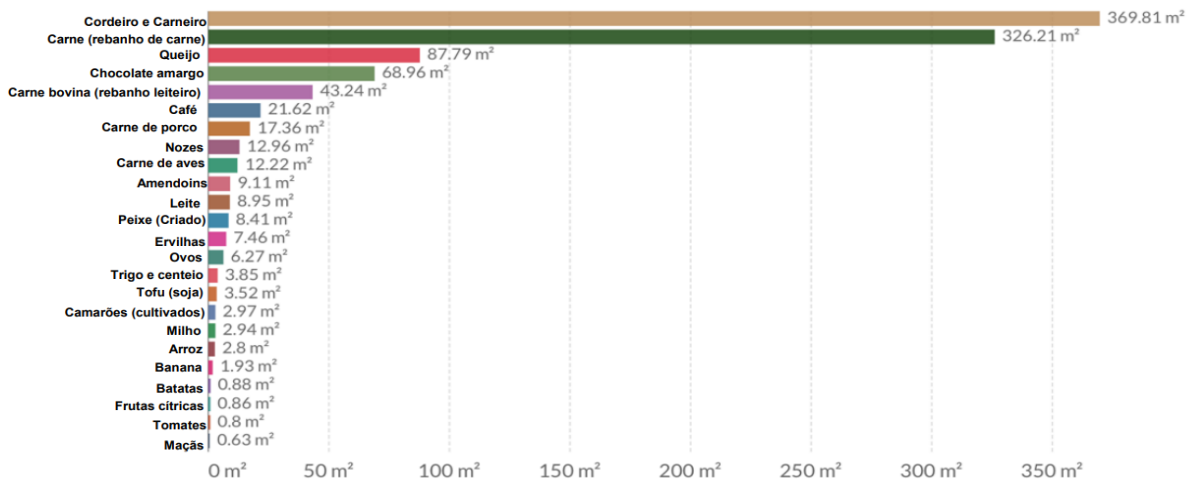
Fonte: Adaptado de POORE e NEMECEK, 2018.

De acordo com Poore e Nemecek (2018), aproximadamente 2,9 bilhões de hectares de terra são utilizados para criação de animais. Cerca de 1,2 bilhões são destinados à agricultura, dentre os quais, 57% são culturas agrícolas para consumo humano e os outros 43% são para a pecuária, isto é, são para o cultivo de matéria-prima para produzir ração animal.

A figura 2 mostra o uso da terra por quilo de alimento produzido, isto é, quantos metros quadrados são necessários para produzir 1 kg de determinados alimentos. No caso da carne bovina, são utilizados 326,21 m<sup>2</sup>, enquanto que, para

produzir a mesma quantidade de produtos de origem vegetal, como o trigo, são utilizados menos de 10 m<sup>2</sup> de terra.

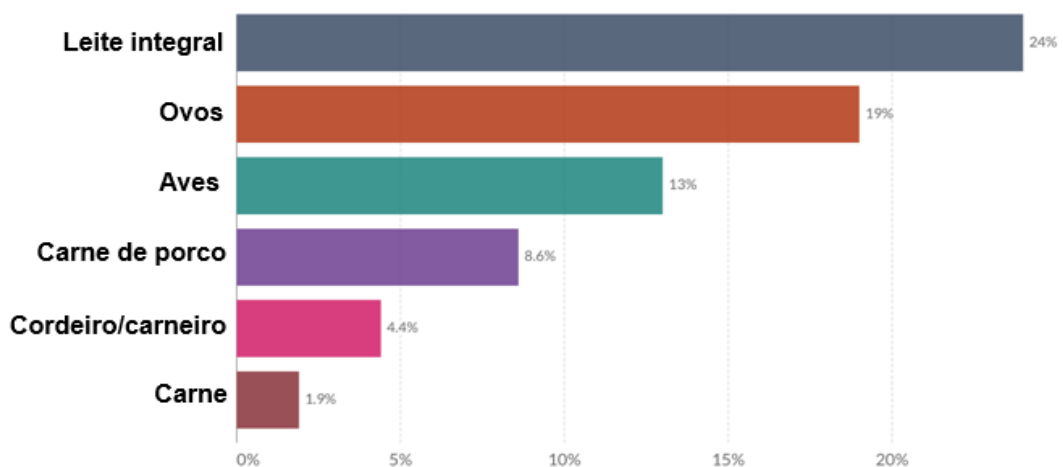
Figura 2 - Uso da terra por quilo de produto alimentício.



Fonte: Adaptado de POORE e NEMECEK, 2018.

Em relação à eficiência energética, na figura 3, vê-se que apenas 1,9% das calorias ingeridas por bovinos são convertidas em carne para o consumo humano, ou seja, a cada 100 kcal que o animal ingere de vegetais ou grãos, fornecerá apenas a quantidade equivalente a 2 kcal de carne bovina. Isso mostra que a eficiência de conversão energética desses animais é baixa, de forma que, com a redução do consumo de carne bovina, ter-se-ia um impacto positivo, promovendo a diminuição do uso da terra.

Figura 3 - Eficiência energética da produção de carnes e laticínios.

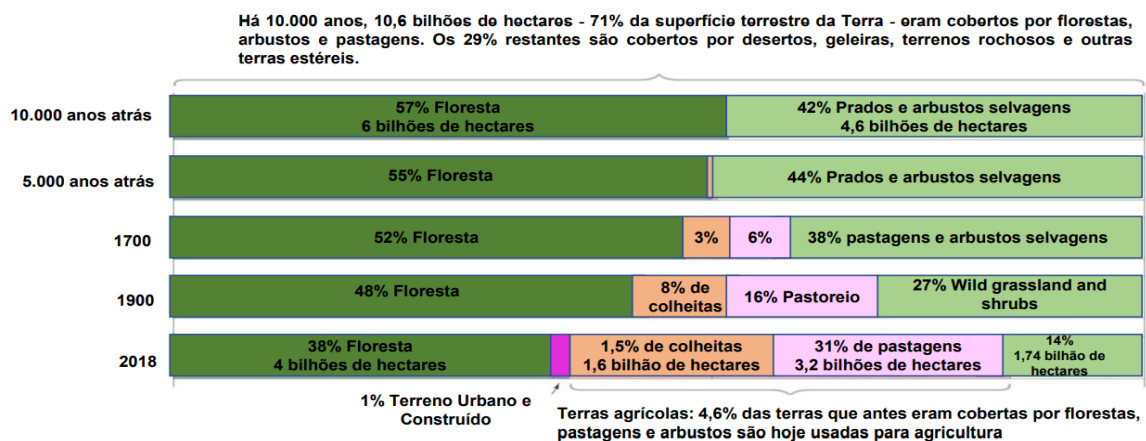


Fonte: Adaptado de ALEXANDER et al., 2016.

### 1.1.4 Extinção de biodiversidade

A perda da biodiversidade vem aumentando em todo o mundo: a taxa global de extinção de espécies, atualmente, é a maior quando comparada com as taxas médias nos últimos 10 milhões de anos. Em muitos países, o desmatamento ainda é recorrente e a cobertura florestal hoje é menor do que há três décadas em todo o mundo. A figura 4 mostra o que está impulsionando a destruição de florestas e de vegetação natural: a substituição dessas áreas por espaços para a criação de gado e para a agricultura. O uso da terra pela agropecuária é uma das principais ameaças à biodiversidade.

Figura 4 - Áreas de florestas e de vegetação natural destruídas pela humanidade



Fonte: Adaptado de BENTON, 2021.

A produção de alimentos também depende do uso de água, terra, energia, fertilizantes e pesticidas, além de práticas insustentáveis como a monocultura e cultivo extensivo. Esses fatores fizeram com que a variedade de paisagens e de habitats diminuísse, prejudicando ou impedindo a reprodução, a alimentação e a acomodação de animais, extinguindo muitas espécies de animais e de plantas nativas (BENTON, 2021).

O impacto gerado pela agricultura e pecuária também impulsiona as mudanças climáticas, degradando os habitats e dispersando os animais para outros

lugares, colocando-os em contato e/ou competição com outras espécies, o que cria oportunidades para o surgimento de novas doenças. A reforma do sistema de produção de alimentos é necessária para que os danos causados não sejam ainda maiores e não ameacem nossa capacidade de sustentar a população mundial (BENTON, 2021).

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Assim, o objetivo deste estudo é, por meio de uma revisão da literatura, obter informações para melhor compreensão dessa alternativa produzida por bactérias para a produção de proteína de forma mais sustentável utilizando microrganismos, isto é, a produção de proteína unicelular ou microbiana.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Pesquisar estudos sobre proteína unicelular/microbiana em bases de dados eletrônicos;
- b) selecionar os artigos científicos de pesquisa específicos sobre proteína unicelular/microbiana;
- c) coletar dados sobre o processo produtivo da proteína unicelular/microbiana (condições de processo, como temperatura e tipos de reatores);
- d) verificar quais os principais microrganismos utilizados para produção de proteína unicelular/microbiana;
- e) caracterizar a proteína microbiana em termos de teor de proteína obtido e evidenciar as vantagens para o meio-ambiente em comparação com outros tipos de proteína.

### 3 METODOLOGIA

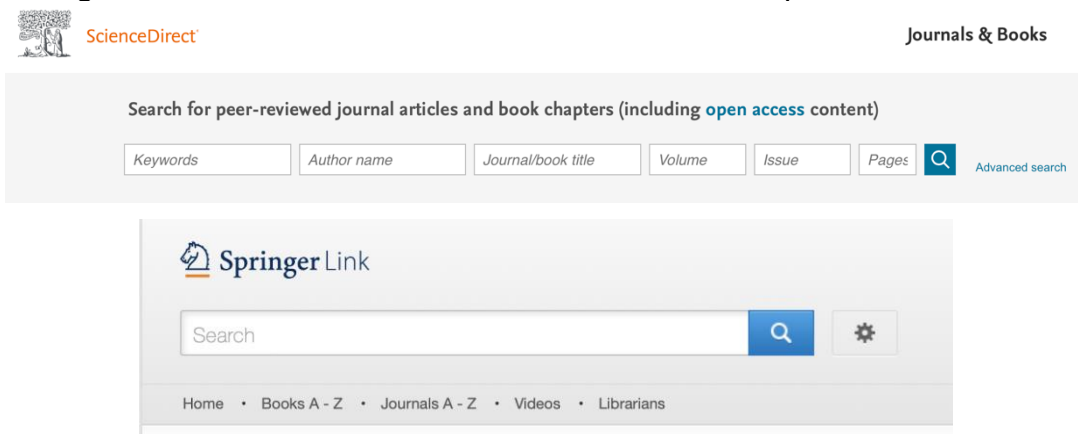
#### 3.1 Bases de dados bibliográficos

A presente revisão bibliográfica baseou-se no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews (PRISMA)*, conforme as seguintes etapas: (1) formulação da questão norteadora da pesquisa; (2) busca e seleção de estudos; (3) avaliação crítica de informações dos estudos para inclusão no trabalho; (4) leitura na íntegra dos artigos e coleta de resultados; (5) redação do trabalho (PEREIRA, 2021).

#### 3.2 Estratégia de busca, seleção e avaliação dos estudos

O objetivo da pesquisa foi resumido na seguinte pergunta norteadora: Como é produzida a proteína unicelular/microbiana para consumo humano? Para a seleção dos estudos, foram consultadas as bases de dados eletrônicas, *Science Direct* e *Springer Link*.

Figura 5 - Bases de dados eletrônicas utilizadas no presente trabalho.



Fonte: Captura de tela feita pela autora, 2022.

As buscas foram realizadas entre os meses de agosto de 2021 a julho de 2022. O idioma das publicações foi limitado ao inglês. As palavras-chave utilizadas foram “*microbial protein*” e “*single-cell protein*”, junto ao operador booleano AND e a palavra “*food*”, para limitar a pesquisa à área de alimentos. A escolha dos descritores teve como base artigos de pesquisa (MARTÍNEZ, 2021), (REIHANI, 2019),

(RAVINDRA, 2000), (PIKAAR, 2018), (EHSANI, 2019), (JÄRVIÖ, 2021), (KHOSHNEVISAN, 2022), (MATASSA, 2016), (NYYSSÖLÄ, 2022), (SPANOGHE, 2021), (UPADHYAYA, 2016) e um livro (ERCILI-CURA, 2021). Foram considerados apenas artigos de pesquisa originais, excluindo-se artigos de revisão, opiniões de especialistas, comunicações breves, cartas ao editor, capítulos de livros, resumos de congressos e trabalhos duplicados. Com o intuito de abranger o maior número possível de estudos, não foi determinado um limite para a data de publicação dos artigos.

A etapa de seleção baseou-se na leitura do título e no resumo das publicações. Foram selecionados artigos cujo foco limitava-se ao tema proposto, tendo sido desconsiderados aqueles que, apesar de aparecerem no resultado da busca, não possuíam respostas para a questão norteadora da pesquisa e excluindo os artigos disponíveis na plataforma.

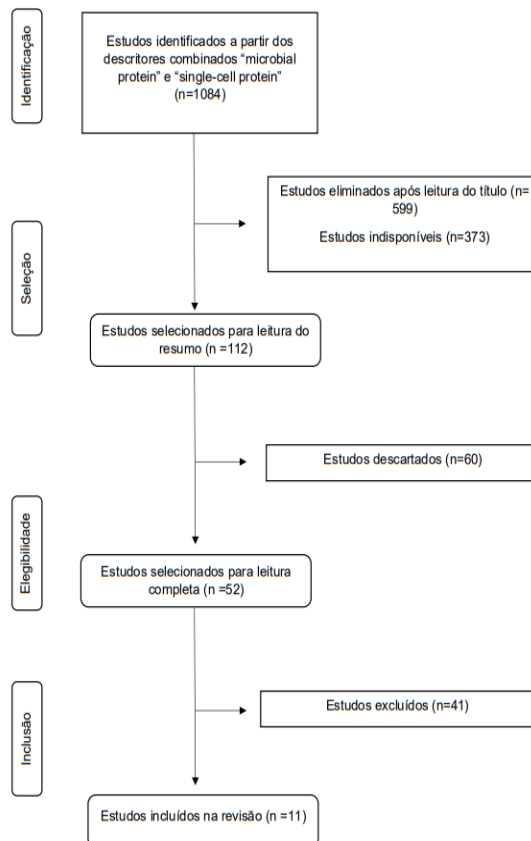
Algumas informações – número de citações e metodologia de pesquisa, por exemplo – dos artigos selecionados previamente foram avaliadas. As publicações com maior relevância científica e tecnológica tiveram seus resultados coletados e organizados em planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel*.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Busca e seleção de artigos

Primeiramente, a busca totalizou 1084 artigos. Destes, 972 foram excluídos, após leitura dos títulos, pois em geral se tratavam de proteínas em ruminantes, não se adequando aos critérios de inclusão estabelecidos. Os 52 artigos restantes foram lidos na íntegra e 11 foram incluídos nesta revisão (Figura 6).

Figura 6 - Representação esquemática da metodologia utilizada para identificação, seleção, elegibilidade e inclusão dos artigos científicos.



Fonte: Do autor, 2022.

### 4.2 Proteína unicelular

A proteína unicelular é uma alternativa para atender à crescente demanda global de proteína, por ser uma fonte mais sustentável desse nutriente do que os produtos de origem animal (MARTÍNEZ, 2021). A proteína unicelular produzida à base de hidrogênio e uso de energia solar desempenha um papel importante na possibilidade de produzir uma proteína com baixa emissão de gases de efeito estufa em relação às tradicionais, como a carne bovina e alguns vegetais (MARTÍNEZ, 2021).

Considerando os diversos tipos de microrganismos existentes, a investigação das condições ideais para sua produção em larga escala e para a melhor qualidade nutricional do PU (Proteína Unicelular) continua sendo uma área atrativa de pesquisa em todo o mundo. Estudos estão sendo realizados para identificar possíveis substratos e métodos alternativos que eliminem dificuldades inerentes aos métodos atualmente usados para produzir proteína de célula única (REIHANI, 2019).

O termo "proteína unicelular" foi determinado em uma reunião realizada no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em 1968 para substituir os termos utilizados para definir "proteína microbiana" (RAVINDRA, 2000).

O primeiro registro da utilização de microrganismos foi por volta de 2600 a.C., quando foram encontrados vestígios de pão. Ademais, há milhares de anos, o ser humano consome produtos que envolvem microrganismos na sua fabricação, tais como queijos, iogurte, bebidas alcoólicas e molho de soja.

Atualmente, as proteínas unicelulares podem ser produzidas de muitas formas, utilizando-se algas, fungos e bactérias. Em geral, são usados fungos e bactérias cultivados em subprodutos e resíduos industriais devido ao seu rápido crescimento e alto teor de proteínas (RAVINDRA, 2000). A proteína unicelular pode ser utilizada para produzir alimentos ricos em proteína de alta qualidade, de forma independente do sistema de agricultura tradicional, sem necessidade de matéria-prima para alimentação de animais (MARTÍNEZ, 2021). Além disso, sua eficiência energética é mais alta em comparação a outros alimentos que independem da luz solar, como vegetais cultivados em plantações artificiais (MARTÍNEZ, 2021).

Os custos de produção de proteína microbiana são avaliados em US\$ 2.800 por tonelada de produto, ou seja, a biomassa microbiana seca. Os custos de produção de hidrogênio por meio de eletrólise da água representam cerca de 60% dos custos totais da produção de proteína microbiana. Estes são estimados baseados em um custo de hidrogênio de US\$ 3/kg, por meio da eletrólise da água, utilizando energia

renovável como fonte de energia a um preço unitário de US\$ 0,05 por kWh (PIKAAR, 2018).

Levando em consideração os custos totais de produção de cerca de US\$ 2.800/t (biomassa seca de base microbiana com um teor de proteína bruta de 70-75%; todos os custos em termos de ingredientes, mistura, bombeamento, desidratação, secagem, esterilização, processamento, despesas gerais e CAPEX) e o valor atual de proteína de alta qualidade para alimentação humana de cerca de US\$ 3.500-5.000/t, é visto que a captura de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) para proteína microbiana já possui viabilidade econômica (PIKAAR, 2018).

### 4.3 Fermentação de precisão

A produção da proteína unicelular inicia-se a partir da fabricação da massa celular, utilizando microrganismos cultivados em resíduos agrícolas e/ou industriais. Produzir essa biomassa consiste em um processo de fermentação submersa ou em estado sólido e, posteriormente à fermentação, esta é recolhida, podendo ser submetida a etapas de processamento como lavagem, ruptura, extração e purificação das proteínas (RAVINDRA, 2000). O grau de processamento está atrelado ao produto ser destinado para o consumo humano ou animal. Diversos microrganismos podem ser utilizados para produção da proteína unicelular, como algas, bactérias e fungos (MARTÍNEZ, 2021). É uma alternativa para energia limpa e segurança alimentar.

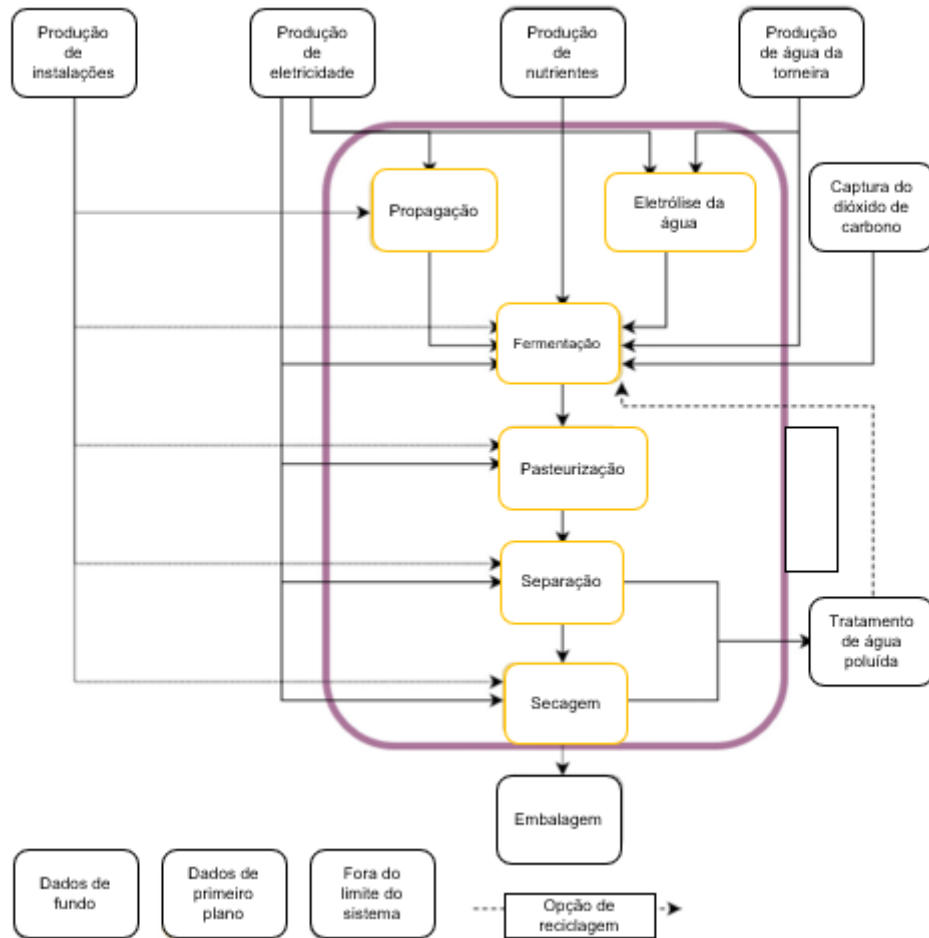
Bactérias oxidantes de hidrogênio (do inglês, *hydrogen-oxidizing bacteria*, HOB) são bactérias autotróficas facultativas, que possuem a capacidade de utilizar gás hidrogênio como doador de elétrons e o oxigênio como aceptor de elétrons para fixar CO<sub>2</sub>, podendo ser Gram-negativas ou Gram-positivas. Possuem um grande potencial biotecnológico como produtoras de proteína unicelular (PU) (EHSANI, 2019).

A utilização de microrganismos autotróficos, que são capazes de obter carbono a partir de CO<sub>2</sub> ou metano (CH<sub>4</sub>), é vantajosa, pois o processo de produção é completamente independente da agricultura ao ar livre. As bactérias metanotróficas obtêm energia e carbono do metano, enquanto a HOB utiliza hidrogênio e CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, não requer plantações como fonte de carbono (JÄRVIÖ, 2021).

A HOB mais utilizado é a espécie *Cupriavidus necator*, devido ao fato de que a biomassa gerada é altamente proteica, sendo acima de 70%. A bactéria utiliza a enzima ribulose-1,5-bisfosfato-carboxilase-oxigenase (RuBisCO) no ciclo de Calvin para catalisar a fixação do CO<sup>2</sup>. Assim, possui capacidade para crescer em resíduos, pois pode utilizar amônia e ureia como fontes de N. Para a *C. necator*, níquel e ferro são importantes para a oxidação de H<sup>2</sup> através de hidrogenases (KHOSHNEVISAN, 2022).

Os insumos para produção de HOB são gás carbônico, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e outros nutrientes. O hidrogênio e oxigênio podem ser produzidos via eletrólise da água e os nutrientes são adicionados como uma forma de fertilizantes (JÄRVIÖ, 2021). O gás carbônico e a água podem ser capturados da própria atmosfera, sendo acessível em todo o mundo, através de uma unidade de captura direta do ar (ERCILI-CURA, 2021). Por conseguinte, a produção de proteína unicelular também independe da localização geográfica. Além disso, o uso direto de CO<sup>2</sup> da atmosfera como matéria-prima torna a produção de proteína unicelular negativa em emissões de carbono (RUUSKANEN, 2021). O processo ocorre em um biorreator de tanque com agitação contínua, onde as bactérias crescem em circunstâncias estacionárias (JÄRVIÖ, 2021). Uma característica atrativa da produção de proteína unicelular com HOB autotrófico é o fato de ter a possibilidade de utilizar geração de energia renovável, como por exemplo, o uso de gás hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água, alimentada por energia eólica ou solar, além da gaseificação de biomassa (MATASSA, 2016). Na figura 7 é apresentado o fluxograma da produção da proteína microbiana.

Figura 7 - Fluxograma e limites do sistema de produção de proteína microbiana.



Fonte: Adaptado de JÄRVIÖ, 2021.

A produção de proteína unicelular começa através da propagação do HOB para fermentação, aumentando o volume do cultivo, ocorrendo em um biorreator de tanque agitado contínuo no qual as bactérias crescem continuamente em condições de estado estacionário. Os principais insumos para a fermentação são hidrogênio, oxigênio e CO<sub>2</sub>, sendo o hidrogênio e o oxigênio feitos a partir de água e eletricidade por meio da eletrólise. O meio que é fornecido continuamente no cultivo através da esterilização do filtro possui amônio, sódio, potássio, ferro e cálcio, além de zinco, vanádio, boro, molibdênio, cobalto, níquel e cobre em pequenas quantidades. Para controlar o pH é utilizado ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) e hidróxido de sódio (NaOH). A eletricidade é necessária, além da eletrólise, para a mistura do reator e bombeamento dos meios de alimentação. Caso o CO<sub>2</sub> utilizado como fonte de carbono seja liberado de volta para a atmosfera no momento do consumo da proteína microbiana, este não

terá efeito no potencial do aquecimento global. Depois da fermentação, o caldo é pasteurizado por aquecimento com vapor de baixa pressão a 120 °C. Em seguida, ocorre a etapa de separação em que é separada a biomassa do resíduo líquido na centrífuga contínua (JÄRVIO, 2021). Este resíduo é enviado para o tratamento de esgoto municipal e a biomassa concentrada segue para a secagem. Nesta etapa, um secador de tambor é usado para remover o excesso de água do restante do produto e é aquecido com baixo vapor de pressão, cerca de 120 °C. O produto obtido é a proteína unicelular que sai em pó, semelhante à farinha (JÄRVIO, 2021).

Bactérias, por serem unicelulares, conseguem se multiplicar mais rapidamente do que microrganismos mais complexos e toda a biomassa celular é, a princípio, comestível. Dependendo da espécie e das condições em que os microrganismos crescem, altas concentrações de proteínas, de 30 a 80%, podem ser obtidas juntamente com outros compostos (NYSSÖLÄ, 2022).

A utilização de bactérias é limitada devido ao alto custo, o que se deve ao fato de que as células possuem um tamanho menor e necessitam ficar floculadas para fornecer uma pasta de sólidos mais alta antes da centrifugação. As células bacterianas também possuem alto conteúdo de ácidos nucleicos (RAVINDRA, 2000). O valor nutritivo da biomassa gerada varia de acordo com a composição e o perfil de cada microrganismo. Na tabela 2, são apresentados os teores de macronutrientes e micronutrientes do produto final gerado por algas, fungos e bactérias.

Tabela 2 - Comparação entre algas, fungos e bactérias.

Componente	Composição percentual do peso		
	Alga	Fungo	Bactéria
Proteínas	40-60 <sup>a</sup>	30-70 <sup>a</sup>	50-83 <sup>a</sup>
Nitrogênio total (Proteína + Ácidos nucleicos)	45-65 <sup>a</sup>	35-50 <sup>a</sup>	60-80 <sup>a</sup>
Lisina	4.6-7.0 <sup>a</sup>	6.5-7.8 <sup>a</sup>	4.3-5.8 <sup>a</sup>
Metionina	1.4-2.6 <sup>a</sup>	1.5-1.8 <sup>a</sup>	2.2-3.0 <sup>a</sup>
Gordura/lipídios	5-10 <sup>a</sup>	5-13 <sup>a</sup>	8-10 <sup>a</sup>
Carboidratos	9	NA	NA
Pigmento biliar e clorofila	6	NA	NA
Ácidos nucléicos	4-6 <sup>a</sup>	9.70	15-16 <sup>a</sup>
Sais minerais	7	6.6	8.6
Aminoácidos	NA	54	65
Cinzas	3	NA	NA
Umidade	6.0	4.5-6.0 <sup>a</sup>	2.8
Fibra	3	NA	NA

Fonte: Adaptado de RAVINDRA, 2000.

NA: Não se aplica.

Macronutrientes, como carboidratos, gorduras, proteínas, ácidos nucléicos e componentes da parede celular e micronutrientes, como vitaminas e nitrogênio, precisam ser analisados antes que o produto obtido seja usado. As algas contêm cerca de 40 a 60% de proteínas, gorduras e vitaminas; cerca de 7% em minerais,

clorofila, pigmentos e fibras; e baixo teor de ácido nucleico, entre 4 e 6%. Os fungos fornecem vitaminas do complexo B, além de possuírem baixo teor de ácido nucleico (9,7%). As bactérias são ricas em proteínas e determinados aminoácidos essenciais. O teor de proteína bruta é em torno de 80% do peso total seco. O ácido nucleico é considerado alto, principalmente o RNA, em torno de 15 a 16% do peso seco. É rico em metionina, cerca de 2,2 a 3%, sendo maior que o da alga com cerca de 1,4 a 2,6, e fungos com 1,8 a 2,5 (RAVINDRA, 2000). As bactérias oxidantes de hidrogênio acumulam cobalamina (vitamina B12), além de outras vitaminas do complexo B, como B1, B2, B6, ácido fólico (B9), niacina (B3), ácido pantotênico (B5) e biotina (B7). A vitamina B12 possui um papel importante na construção dos glóbulos vermelhos, sua deficiência leva a anemia e pode ter consequências graves (ERCILI-CURA, 2021). Além disso, são encontrados minerais como ferro e magnésio em grandes quantidades na biomassa bacteriana, todas essas características tornam a biomassa de bactérias oxidantes de hidrogênio um substituto adequado para produtos alimentícios de origem animal (ERCILI-CURA, 2021).

Apesar de a alga ser uma boa fonte de valor nutritivo, ainda possuem limitações para o consumo humano devido ao fato da presença da parede celular das algas. Os seres humanos não possuem a enzima celulase necessária para digestão desse componente e, para que seja utilizada no consumo humano, é necessário que elas sejam digeridas antes da aplicação no produto final. Geralmente, a produção de algas é feita ao ar livre e depende das condições climáticas. Portanto, algas produtivas e as condições climáticas são importantes para a produção (RAVINDRA, 2000), pois estas são capazes de fazer fotossíntese e fixação de CO<sub>2</sub> e são importantes geradores de oxigênio, assim como na produção da proteína (NYYSSÖLÄ, 2022).

O desafio da utilização de fungo é a toxina produzida que pode causar reações alérgicas, doenças e câncer de fígado em humanos. Por isso, é necessário que as microtoxinas sejam eliminadas (RAVINDRA, 2000). A utilização do fungo é feita principalmente em fermentações submersas, porém possui um interesse crescente na fermentação sólida, porque normalmente dispõe nutrientes e suporte físico para a cultura. Logo, menor consumo de energia e menor produção de efluentes são as vantagens que a fermentação sólida oferece. Contudo, o malefício é que no uso de resíduos complexos, os microrganismos podem formar metabólitos secundários tóxicos. Além da qualidade nutricional, a utilização do fungo pode ser

usada para melhorar as propriedades funcionais como a textura e capacidade de emulsificação na indústria alimentícia (NYSSÖLÄ, 2022).

Para o crescimento das algas, os principais substratos são o dióxido de carbono e a luz solar. O crescimento dos fungos utiliza diferentes substratos, principalmente os que fornecem carbono e nitrogênio. As bactérias podem ser cultivadas em resíduos ou subprodutos obtidos dos processos industriais (RAVINDRA, 2000).

#### 4.4 Aplicações e legislação

A proteína unicelular pode ser usada como ingrediente em alimentos como pães, massas e suplementos de proteína, podendo ser consumida de diversas formas. Possui todos os aminoácidos essenciais em sua composição, sendo o teor de cada um semelhante ou superior às diretrizes da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura) e teor de proteína geralmente maior do que o farelo de soja (MARTÍNEZ, 2021).

Atualmente, nenhum produto feito a partir da biomassa de HOB foi comercializado ainda. Várias empresas estão trabalhando em processos legislativos para produção dessa em larga escala (ERCILI-CURA, 2021) como *Solein*, *Novomeal* e *Proton* (SPANOGHE, 2021).

A Autoridade de Segurança dos Alimentos Europeia (EFSA) realiza a avaliação científica dos riscos envolvidos em novos tipos de alimentos e qualquer alimento que tenha sido criado a partir de 1997 precisa de autorização antes que seja colocado no mercado da União Europeia para consumo humano (ERCILI-CURA, 2021). As empresas pioneiras na produção de proteína unicelular para consumo humano são: *Solar Foods*, *Novo Nutrients*, *Avecom*, *Deep Branch*, *Kiverdi* e *LanzaTech* nos seguintes países: Finlândia, Estados Unidos, Bélgica, Reino Unido, Estados Unidos e Estados Unidos, respectivamente. A utilização da proteína unicelular para o consumo animal não é uma opção a ser considerada, já que a eficiência de conversão calórica dos produtos animais varia entre 3 e 31%, havendo uma diminuição significativa na quantidade final de calorias. Portanto, o ideal é o consumo, por parte dos seres humanos, de forma direta ou como ingrediente em outros produtos (MARTÍNEZ, 2021).

## 5 CONCLUSÃO

Com o aumento crescente da população mundial, a proteína unicelular produzida por microrganismos como bactérias, algas e fungos é uma boa fonte proteica com alta qualidade e baixo teor de gordura (UPADHYAYA, 2016). Assim, esse ingrediente é considerado uma ótima alternativa para a produção de alimentos ricos em proteínas. No entanto, os processos de produção ainda precisam ser estudados para otimização das condições de processamento em larga escala e os produtos obtidos precisam ser certificados pelos órgãos competentes, garantindo a sua segurança. Além do seu valor nutritivo, a proteína unicelular é produzida de forma mais sustentável do que outros produtos fontes de proteína, principalmente a carne bovina, em termos de emissões de gases estufa e uso de terra, tendo menor impacto nos ecossistemas e contribuindo para a preservação do meio ambiente, da fauna e da flora mundial (UPADHYAYA, 2016). Portanto, conclui-se que a proteína unicelular produzida por bactérias é uma boa alternativa a ser estudada para que, no futuro, a segurança alimentar seja garantida à população.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, P. et al. *Human appropriation of land for food: the role of diet*. **Global Environmental Change**, v. 41, p. 88-98, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.09.005>. Acesso em: 2022.
- BENTON, T. G. et al. *Food system impacts on biodiversity loss*. **Chatham House**, Londres, 2021. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/2021/02/food-system-impacts-biodiversity-loss>. Acesso em: 2022.
- EHSANI, E. et al. *Enriched hydrogen-oxidizing microbiomes show a high diversity of co-existing hydrogen-oxidizing bacteria*. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 103, n. 19, p. 8241-8253, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10082-z>. Acesso em: 2022.
- ERCILI-CURA, D.; BARTH, D. **Cellular agriculture: lab grown foods**. *American Chemical Society*, 2021.
- Food out of thin air*. **SOLAR FOODS**, 2022. Disponível em: <https://solarfoods.com/>. Acesso em: 13 set. 2021.
- Godfray, H. C. J. **Meat: The future series-alternative proteins**. *World Economic Forum*, 2019.
- JÄRVIÖ, NYSSÖLÄ N. et al. *An attributional life cycle assessment of microbial protein production: a case study on using hydrogen-oxidizing bacteria*. **Science of The Total Environment**, v. 776, p. 145764, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145764>. Acesso em: 2022.
- KHOSHNEVISAN, B. et al. *From renewable energy to sustainable protein sources: Advancement, challenges, and future roadmaps*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 157, p. 112041, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.112041>. Acesso em: 2022.
- KUMAR, P. et al. *Meat analogues: health promising sustainable meat substitutes*. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 57, n. 5, p. 923-932, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.939739>. Acesso em: 2021.
- MARTÍNEZ, J. B. García et al. *Potential of microbial protein from hydrogen for preventing mass starvation in catastrophic scenarios*. **Sustainable production and consumption**, v. 25, p. 234-247, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016%2Fj.spc.2020.08.011>. Acesso em: 2022.
- MATASSA, S. et al. *Autotrophic nitrogen assimilation and carbon capture for microbial protein production by a novel enrichment of hydrogen-oxidizing bacteria*. **Water Research**, v. 101, p. 137-146, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.077>. Acesso em: 2022.

NYSSÖLÄ, A. et al. *The role of single cell protein in cellular agriculture*. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 75, p. 102686, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102686>. Acesso em: 2022.

O consumidor brasileiro e o mercado plant based. **The Good Food Institute**, 2022. Disponível em: <https://gfi.org.br/2020/12/07/50-dos-brasileiros-afirmam-reduzir-o-consumo-de-carne/>. Acesso em: 14 jan. 2022.

PEREIRA, N.; FRANCESCHINI, S.; PRIORE, S. Qualidade dos alimentos segundo o sistema de produção e sua relação com a segurança alimentar e nutricional: revisão sistemática. **Saúde e Sociedade**, v. 29, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-12902020200031>. Acesso em: 2022.

PIKAAR, I. et al. *Microbes and the next nitrogen revolution*. **Environment Science Technology**, v. 51, n. 13, p. 7297-7303, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00916>. Acesso em: 2021.

PIKAAR, I. et al. *Carbon emission avoidance and capture by producing in-reactor microbial biomass based food, feed and slow release fertilizer: potentials and limitations*. **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 1525-1530, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.089>. Acesso em: 2022.

POORE, J.; NEMECEK, T. *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers*. **Science**, v. 360, n. 6392, p. 987-992, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>. Acesso em: 2021.

RAVINDRA, P. et al. Value-added food: *Single cell protein*. **Biotechnology Advances**, v. 18, n. 6, p. 459-479, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00045-8](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00045-8). Acesso em: 2022.

REIHANI, S. F. S.; KHOSRAVI-DARANI, K. *Influencing factors on single-cell protein production by submerged fermentation: a review*. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 37, p. 34-40, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2018.11.005>. Acesso em: 2022.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. *CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions*. **Our world in data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 2022.

RUUSKANEN, Vesa et al. *Neo-Carbon Food concept: A pilot-scale hybrid biological-inorganic system with direct air capture of carbon dioxide*. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123423, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123423>. Acesso em: 2021.

SABATÉ, J.; SORET, S. *Sustainability of plant-based diets: back to the future*. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 100, n. 1, p. 476S-482S, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3945/ajcn.113.071522>. Acesso em: 2021.

SAXENA, A. M. ***The vegetarian imperative***. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2011.

SILLMAN, J. et al. *A life cycle environmental sustainability analysis of microbial protein production via power-to-food approaches*. ***The International Journal of Life Cycle Assessment***, v. 25, n. 11, p. 2190-2203, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01771-3>. Acesso em: 2022.

SPANOGHE, J.; VERMEIR, P.; VLAEMINCK, S. E. *Microbial food from light, carbon dioxide and hydrogen gas: Kinetic, stoichiometric and nutritional potential of three purple bacteria*. ***Bioresource Technology***, v. 337, p. 125364, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125364>. Acesso em: 2022.

UPADHYAYA, S. et al. *Microbial protein: a valuable component for future food security*. ***Microbes and Environmental Management***, v. 8, p. 259, 2016. Disponível em: <https://eu.rezosbrands.com/wp-content/uploads/2019/03/Microbial-Protein-A-Valuable-Component-for-Future.pdf>. Acesso em: 2022.