

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINE DE BASTOS BUHRER

FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO DE SUBPRODUTO DA AGROINDÚSTRIA  
DO PALMITO PUPUNHA PARA OBTENÇÃO DE MICOPROTEÍNAS

CURITIBA

2025

CAROLINE DE BASTOS BUHRER

FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO DE SUBPRODUTO DA AGROINDÚSTRIA  
DO PALMITO PUPUNHA PARA OBTENÇÃO DE MICOPROTEÍNAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, no Setor de Tecnologia, na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Dr. Alexandre Claus

Coorientadores: Dr. Celso Garcia Auer  
Dra. Cristiane Vieira Helm  
Dra. Regina Maria Matos Jorge

CURITIBA

2025

**DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

Buhrer, Caroline de Bastos

Fermentação em estado sólido de subproduto da agroindústria do palmito pupunha para obtenção de micoproteínas. / Caroline de Bastos Buhrer. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em m Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Dr. Alexandre Claus

Coorientadores: Dr. Celso Garcia Auer; Dra. Cristiane Vieira Helm; Dra. Regina Maria Matos Jorge

1. Biotransformação. 2. Resíduos lignocelulósicos. 3. Economia circular. 4. Basidiomicetos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial. III. Claus, Alexandre. IV. Auer, Celso Garcia. V. Helm, Cristiane Vieira. VI. Jorge, Regina Maria Matos VII. Título.

**Bibliotecária: Roseny Rivellini Morciani CRB-9/1585**

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CAROLINE DE BASTOS BUHRER**, intitulada: **FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO DE SUBPRODUTO DA AGROINDÚSTRIA DO PALMITO PUPUNHA PARA OBTENÇÃO DE MICOPROTEÍNAS**, sob orientação do Prof. Dr. ALEXANDRE CLAUS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Novembro de 2025.

Assinatura Eletrônica

17/11/2025 15:07:13.0

ALEXANDRE CLAUS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

17/11/2025 15:07:17.0

THAMIRIS RENATA MARTINY

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

20/11/2025 10:11:31.0

ÁLVARO FIGUEREDO DOS SANTOS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA)

Dedico este trabalho aos meus pais:

À minha mãe, pelo incentivo constante em todas as etapas da minha formação.

Ao meu pai, *in memoriam*, por sempre priorizar meus estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial da Universidade Federal do Paraná pelo suporte concedido durante o mestrado. Registro minha gratidão ao professor Alexandre Claus, meu orientador, pela generosidade no compartilhamento de conhecimentos, e aos coorientadores Celso Garcia Auer, Cristiane Vieira Helm e Regina Maria Matos Jorge, pela disponibilidade e dedicação no acompanhamento do estudo.

À minha família, pelo apoio constante em todas as etapas desta jornada. De modo especial, ao meu marido, Rafael Cordasco Penkal, e à nossa filha, Beatriz Buhner Penkal, pela presença afetuosa, paciência e incentivo. Às amigas Marianne Bernardes e Manoela Mendes Duarte, agradeço pela escuta ativa e pelos estímulos valiosos ao longo do processo.

Sou também grata à Embrapa Florestas, pelo fomento ao desenvolvimento técnico-científico e por proporcionar um ambiente colaborativo e enriquecedor, que favorece o aprendizado permanente. Registro minha admiração à equipe do Laboratório de Patologia Florestal, em especial a Alessandra Keiko Nakasone, Celso Garcia Auer e Douglas Lau, cuja dedicação é fonte constante de inspiração. Aos colegas de trabalho, expresso reconhecimento pela amizade e pelo apoio técnico durante o mestrado, em particular a Claudia Mara Pereira, Dayanne Regina Mendes Andrade e Fabrício Augusto Hansel.

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. BRASIL, Constituição Federal de 1988, art. 225.



## RESUMO

A fermentação em estado sólido aplicada à bainha interna do palmito pupunha promoveu incremento nos teores de proteínas e minerais dos substratos fermentados, em decorrência do crescimento micelial e da formação de biomassa micoproteica, demonstrando o potencial desse processo para a valorização nutricional de subprodutos agroindustriais, com perspectivas de aplicação futura nos segmentos alimentar e zootécnico. Este estudo teve como objetivo avaliar a bioconversão da bainha interna do palmito pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth) por basidiomicetos (*Ganoderma lucidum*, *Macrocybe titans*, *Pleurotus djamor*, *Lentinula edodes* e *Fabiosporus sanguineus*) em diferentes períodos de incubação (15, 30, 45 e 60 dias), visando à produção de biomassa fermentada com micoproteínas associadas ao substrato fermentado. Foram realizadas análises centesimal, elementar e mineral, além da quantificação de compostos fenólicos. Aos 60 dias de incubação, *Pleurotus djamor* e *Lentinula edodes* destacaram-se pelos maiores teores de proteínas (25,19 e 23,20 g/100 g, respectivamente) e minerais, sendo *P. djamor* mais rico em potássio, magnésio e manganês, e *L. edodes* em fósforo, cálcio, ferro e zinco. O aumento dos teores de nitrogênio e enxofre e a redução da razão C:N confirmam o enriquecimento proteico da biomassa e a eficiência da biotransformação. A fração fibrosa manteve-se elevada (53,88 a 60,85 g/100 g), resultando em baixa densidade energética (114,04 a 147,39 kcal/100 g) e conferindo potencial funcional descrito na literatura como associado à promoção da saciedade e à modulação do aporte energético. O perfil enriquecido em proteínas e minerais, aliado aos elevados teores de fenólicos (até 169 mg GAE/100 g), indica potencial antioxidante e agrega valor aos bioprodutos obtidos. Os resultados obtidos demonstram que os bioprodutos apresentam características compatíveis com as diretrizes técnicas e regulatórias estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pela ABNT NBR 17100-1:2023, pela ABNT NBR 10004-1:2024, pela Instrução Normativa nº 81/2018 do Mapa e pela RDC nº 54/2012 da Anvisa, indicando potencial enquadramento como subproduto reaproveitado, coproduto proteico ou ingrediente alimentar, condicionado à realização dos procedimentos de validação tecnológica, sanitária e regulatória. Conclui-se que a FES da bainha interna da pupunha constitui uma estratégia biotecnológica promissora, sustentável e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente à promoção de consumo e produção responsáveis.

Palavras-chave: Bioconversão; resíduos lignocelulósicos; basidiomicetos; enriquecimento proteico; bioeconomia circular.



## ABSTRACT

Solid-state fermentation applied to the inner sheath of peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth) promoted increases in protein and mineral contents of the fermented substrates as a result of mycelial growth and the formation of mycoprotein biomass, demonstrating the potential of this process for the nutritional valorization of agro-industrial by-products, with prospects for future application in the food and animal nutrition sectors. This study aimed to evaluate the bioconversion of peach palm inner sheath by basidiomycetes (*Ganoderma lucidum*, *Macrocybe titans*, *Pleurotus djamor*, *Lentinula edodes* and *Fabiosporus sanguineus*) at different incubation periods (15, 30, 45 and 60 days), seeking the production of mycoprotein biomass associated with the fermented substrate. Proximate, elemental and mineral analyses were performed, as well as the quantification of phenolic compounds. After 60 days of incubation, *Pleurotus djamor* and *Lentinula edodes* showed the highest protein contents (25.19 and 23.20 g/100 g, respectively) and mineral enrichment, with *P. djamor* presenting higher levels of potassium, magnesium and manganese, while *L. edodes* exhibited higher concentrations of phosphorus, calcium, iron and zinc. The increase in nitrogen and sulfur contents and the reduction in the C:N ratio confirmed the protein enrichment of the biomass and the efficiency of the biotransformation process. The fiber fraction remained high (53.88 to 60.85 g/100 g), resulting in low energy density (114.04 to 147.39 kcal/100 g) and providing functional potential described in the literature as associated with the promotion of satiety and modulation of energy intake. The protein-enriched and mineral-enriched profile, combined with high phenolic contents (up to 169 mg GAE/100 g), indicates antioxidant potential and adds value to the bioproducts obtained. The results demonstrate that these bioproducts present characteristics compatible with the technical and regulatory guidelines established by the Brazilian National Solid Waste Policy (PNRS), ABNT NBR 17100-1:2023, ABNT NBR 10004-1:2024, MAPA Normative Instruction No. 81/2018, and ANVISA Resolution RDC No. 54/2012, indicating potential classification as a reused by-product, protein co-product or food ingredient, subject to technological, sanitary and regulatory validation procedures. In conclusion, solid-state fermentation of peach palm inner sheath represents a promising and sustainable biotechnological strategy aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), especially those related to responsible consumption and production.

**Keywords:** Bioconversion; lignocellulosic residues; basidiomycetes; protein enrichment; circular bioeconomy.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PRODUÇÃO DA CONSERVA DE PALMITO PUPUNHA .....	25
FIGURA 2 - ETAPAS DA PRODUÇÃO DA CONSERVA DE PALMITO PUPUNHA.	40
FIGURA 3 - COLONIZAÇÃO DA BAINHA INTERNA DA PUPUNHA PELOS BASIDIOMICETOS ESTUDADOS .....	49
FIGURA 4 - BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS OBTIDOS POR FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO.....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DOS SUBSTRATOS FERMENTADOS .....	56
GRÁFICO 2 - PERFIL DE MINERAIS DOS SUBSTRATOS FERMENTADOS.....	58

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PERFIL DE AMINOÁCIDOS DESCRITOS PARA OS BASIDIOMICETOS ESTUDADOS .....	29
QUADRO 2 - FUNÇÕES FISIOLÓGICAS DOS MINERAIS.....	30
QUADRO 3 - PRINCIPAIS BIOCOMPOSTOS ASSOCIADOS ÀS ESPÉCIES DE BASIDIOMICETOS UTILIZADAS NA FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO .....	34
QUADRO 4 - BASIDIOMICETOS SELECIONADOS PARA A FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO .....	41
QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS NUTRICIONAIS E FUNCIONAIS DOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS .....	62
QUADRO 6 - SÍNTESE NORMATIVA APLICÁVEL AOS BIOPRODUTOS PROTEICOS ESTUDADOS .....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TEOR DE CINZAS (g/100 g EM BASE SECA $\pm$ DP) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS AO LONGO DA INCUBAÇÃO .....	52
TABELA 2 - TEOR DE PROTEÍNAS (g/100 g EM BASE SECA $\pm$ DP) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS AO LONGO DA INCUBAÇÃO .....	53
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO CENTESIMAL (g/100 g, BASE SECA $\pm$ DP), COMPOSTOS FENÓLICOS (mg GAE/100 g, BASE SECA $\pm$ DP) E VALOR CALÓRICO (kcal/100 g, BASE SECA) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS .....	54
TABELA 4 - TEORES DE MINERAIS (MÉDIA $\pm$ DP) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS.....	57
TABELA 5 - TEORES DE CARBONO, HIDROGÊNIO, NITROGÊNIO, ENXOFRE (% $\pm$ DP) E RAZÃO C:N NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS .....	59

## **LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA - Análise de Variância

ATP - Adenosina Trifosfato

BDA - Batata-Dextrose-Ágar

BOD - Biochemical Oxygen Demand - Câmara de incubação tipo BOD

CHNS - Análise Elementar de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre

C:N - Relação Carbono:Nitrogênio

DNA - Ácido Desoxirribonucleico

DP - Desvio Padrão

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FES - Fermentação em Estado Sólido

GAE - Equivalente de Ácido Gálico

GL - Grau Gay-Lussac

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDR-PR - Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná

IDR - Ingestão Diária Recomendada

IN - Instrução Normativa

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

P.A. - Puro para Análise

PDCAAS - Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score

pH - Potencial Hidrogeniônico

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RDC - Resolução da Diretoria Colegiada

UFPR - Universidade Federal do Paraná

UV-Vis - Espectrofotometria Ultravioleta-Visível

SDG – Sustainable Development Goals

SSF - Solid-State Fermentation

VBP - Valor Bruto da Produção

## LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

± - Mais ou menos

≥ - Maior ou igual

°C - Graus Celsius

μL - Microlitro

atm - Atmosfera (pressão)

g - Grama

g/ kg - Gramas por quilograma

g/100 g - Gramas por 100 gramas

h - Hora

kg - Quilograma

L - Litro

mg - Miligrama

mg/ kg - Miligrama por quilograma

min - Minuto

mL - Mililitro

mol/ L - Mol por litro

nm - Nanômetro



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
2.1 DESCRIÇÃO DA PUPUNHEIRA E APLICAÇÕES DA BIOMASSA RESIDUAL ..	21
2.2 PRODUÇÃO DA CONSERVA DE PALMITO PUPUNHA.....	23
2.2.1 Resíduos Gerados no Processamento do Palmito Pupunha.....	26
2.2.2 Identificação do Resíduo Crítico.....	27
2.3 FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO .....	28
2.4 BASIDIOMICETOS UTILIZADOS NA FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO.	31
2.5 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: ASPECTOS LEGAIS E REGULATÓRIOS ...	35
2.6 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL A BIOPRODUTOS PROTEICOS OBTIDOS POR FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO .....	37
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO VEGETAL.....	40
3.2 BASIDIOMICETOS UTILIZADOS NA FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO.	41
3.3 PROCESSO DE FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO DA BAINHA INTERNA DE PUPUNHA.....	42
3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS FERMENTADOS.....	43
3.4.1 Determinação de Umidade.....	43
3.4.2 Determinação de Cinzas .....	44
3.4.3 Determinação de Proteínas.....	44
3.4.4 Determinação de Lipídios.....	45
3.4.5 Determinação de Fibras Solúveis e Insolúveis.....	45
3.4.6 Determinação de Carboidratos.....	46
3.4.7 Determinação do Valor Calórico.....	47
3.4.8 Determinação de Minerais.....	47
3.4.9 Análise Elementar (Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre) .....	47
3.4.10 Análise de Compostos Fenólicos .....	48
3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>

4.1 OBTENÇÃO DOS BIOPRODUTOS PROTEICOS POR FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO .....	49
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E NUTRICIONAL DOS BIOPRODUTOS .....	51
4.3 AVALIAÇÃO FUNCIONAL E APLICAÇÕES POTENCIAIS.....	61
4.4 CONSIDERAÇÕES REGULATÓRIAS .....	63
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse pelos impactos ambientais da agroindústria tem estimulado o desenvolvimento de estratégias voltadas à valorização de resíduos orgânicos, em especial os de origem lignocelulósica (Mayer et al., 2020; Zenni, Helm e Tavares, 2018). Entre as cadeias produtivas que mais geram subprodutos, destaca-se a do palmito pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth), reconhecida como alternativa sustentável às espécies nativas exploradas para extração de palmito (MAPA, 2025). Durante o processamento dessa palmeira são produzidos volumes expressivos de biomassa descartada, sobretudo das bainhas internas e externas do caule, frações ricas em fibras e matéria orgânica cujo aproveitamento ainda é incipiente no Brasil (Spacki et al., 2021).

Nesse contexto, a fermentação em estado sólido (FES) surge como alternativa biotecnológica para converter resíduos agroindustriais em produtos de valor agregado, baseando-se no cultivo de microrganismos filamentosos, especialmente fungos basidiomicetos, sobre substratos com umidade controlada, promovendo a degradação da biomassa vegetal e a síntese de proteínas e compostos bioativos (Dedousi et al., 2024; Cruz-Moreno et al., 2023; Cortina-Escribano et al., 2020).

Embora aplicada a diferentes resíduos agrícolas, a utilização da FES especificamente sobre a bainha interna da pupunha ainda é pouco explorada. São escassos os estudos que avaliam comparativamente o desempenho de diferentes espécies fúngicas nesse substrato (Spacki et al., 2021), bem como a caracterização nutricional detalhada e o enquadramento regulatório dos bioprodutos obtidos.

Neste estudo, o termo “micoproteínas” é empregado para designar as micoproteínas associadas à biomassa fúngica obtida por fermentação em estado sólido da bainha interna do palmito pupunha, constituída pelo micélio desenvolvido em associação ao substrato fermentado, sem etapas de isolamento ou purificação proteica (GFI-Brasil, 2022).

Dessa forma, parte-se da hipótese de que a fermentação da bainha interna da pupunha empregando diferentes espécies de basidiomicetos possa resultar em bioprodutos proteicos provenientes de processos biotecnológicos com composição nutricional enriquecida, especialmente em proteínas e minerais, cujo perfil varie conforme a espécie utilizada (Yu et al., 2023; Balbi et al., 2013; El Sheikha et al.,

2022). Considera-se ainda que tais produtos possam apresentar potencial funcional para aplicação nos setores alimentício e agropecuário, respeitando os critérios estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil, 2010b; Brasil, 2010c).

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A justificativa desta pesquisa fundamenta-se em quatro eixos complementares. O primeiro refere-se à abundância e ao potencial nutricional da bainha interna da pupunha, recurso ainda subutilizado pela agroindústria brasileira (Magalhães et al., 2021a; 2021b; Helm et al., 2021). O segundo fundamenta-se na comprovada capacidade dos basidiomicetos em converter resíduos lignocelulósicos em produtos de maior valor agregado por fermentação em estado sólido (Dedousi et al., 2024; Cruz-Moreno et al., 2023; Cortina-Escribano et al., 2020).

Soma-se a isso a crescente demanda por soluções sustentáveis, tecnicamente viáveis e alinhadas aos princípios da bioeconomia e da economia circular (ONU, 2024). Por fim, observa-se uma lacuna de estudos sistemáticos direcionados à aplicação da FES sobre a bainha interna da pupunha, com enfoque na caracterização do substrato fermentado como bioproduto, e não apenas na avaliação dos corpos de frutificação fúngica (Spacki et al., 2021).

Ao articular inovação biotecnológica, sustentabilidade ambiental e segurança regulatória, esta pesquisa visa ampliar as possibilidades de valorização qualificada de resíduos agroindustriais por meio do desenvolvimento de bioprodutos proteicos, contribuindo para a redução de passivos ambientais e o fortalecimento de cadeias produtivas sustentáveis em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU, em especial os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 15 (Vida Terrestre) (ONU, 2024).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar a obtenção de micoproteínas associadas à biomassa fúngica por meio da fermentação em estado sólido da bainha interna do palmito pupunha,

utilizando diferentes espécies de fungos basidiomicetos, com foco no enriquecimento proteico da biomassa fermentada e na avaliação da sua viabilidade como ingrediente para uso alimentar humano e zootécnico.

#### 1.2.2 Objetivos específicos

Produzir biomassa fermentada com micoproteínas associadas por fermentação em estado sólido da bainha interna da pupunha, utilizando as espécies *Ganoderma lucidum*, *Macrocybe titans*, *Pleurotus djamor*, *Lentinula edodes* e *Fabiosporus sanguineus*.

Caracterizar a composição centesimal e o teor de proteína bruta da biomassa fermentada ao longo de diferentes tempos de incubação.

Avaliar o perfil mineral e elementar da biomassa fermentada, visando identificar as espécies fúngicas com maior potencial de enriquecimento nutricional.

Discutir o enquadramento técnico-regulatório dos bioprodutos obtidos, considerando as micoproteínas como componentes associados à biomassa fúngica, e suas possíveis aplicações nos setores alimentício e agropecuário.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 DESCRIÇÃO DA PUPUNHEIRA E APLICAÇÕES DA BIOMASSA RESIDUAL

A pupunheira (*B. gasipaes*), palmeira nativa da região Amazônica, tem expandido seu cultivo para os estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina (Spacki et al., 2021). Por sua adaptabilidade e potencial produtivo, vem se consolidando entre os principais produtos florestais não madeireiros, especialmente na produção de palmito. Nesse contexto, apresenta-se como uma alternativa ecologicamente viável em relação à exploração de espécies nativas da Mata Atlântica (MAPA, 2025).

O Brasil desempenha papel central na cadeia produtiva do palmito, destacando-se tanto pelo volume de produção quanto pelo consumo interno e pelas exportações (Helm et al., 2023a). De acordo com o Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná, 2021), no ano de 2000 o número de mudas de pupunheira plantadas no litoral paranaense não ultrapassava 100 mil. Duas décadas depois, esse total alcançou aproximadamente 10,1 milhões de plantas, cultivadas por cerca de mil agricultores em uma área de 2.030 hectares, distribuída entre os municípios de Paranaguá, Morretes, Antonina, Guaraqueçaba, Pontal do Paraná, Matinhos e Guaratuba.

A matéria-prima é beneficiada por nove agroindústrias instaladas na região, as quais desempenham papel relevante na geração de emprego e renda para as comunidades locais. Entre 2001 e 2019, a produção regional apresentou crescimento médio anual de 26 %, refletindo diretamente sobre o Valor Bruto da Produção (VBP) de palmito no estado, que passou de R\$ 480 mil para R\$ 50,2 milhões nesse período (IDR-Paraná, 2021).

A substituição de espécies nativas, como a juçara (*Euterpe edulis*) e o açai (*Euterpe oleracea*), pela pupunha tem sido recomendada por instituições de pesquisa e órgãos ambientais, devido à sua capacidade de perfilhamento e ao menor impacto ecológico. A juçara não apresenta regeneração após o corte, o que tem contribuído para a redução de suas populações naturais (Godoy et al., 2022). Em contraste, a pupunheira apresenta elevada tolerância ao calor, rebrote vigoroso e maior rusticidade, reduzindo a necessidade de replantio e apresentando-se como alternativa agronomicamente mais viável (Rodrigues et al., 2017; Silva, 2008). O

açaí, embora também apresente perfilhamento e rusticidade, tem seu cultivo voltado principalmente para a produção de frutos, o que restringe sua utilização como alternativa sustentável para o mercado de palmito (EMBRAPA, 2022).

Além dessas vantagens no cultivo, o palmito de pupunha possui boa aceitação sensorial e perfil nutricional equilibrado, sendo um alimento de baixo valor calórico, rico em fibras, potássio, cálcio e fósforo, além de fornecer vitaminas e aminoácidos com potencial funcional (Resende et al., 2009). Embora a produção de palmito seja economicamente relevante, demanda o corte integral da pupunheira, ocasionando a produção de grandes volumes de biomassa residual (Santos, Bolanho e Danesi, 2021).

O aumento expressivo da geração de resíduos lignocelulósicos na agroindústria brasileira, inclusive no processamento do palmito, reforça a necessidade de desenvolver tecnologias voltadas ao seu reaproveitamento (Mayer et al., 2020). Diversas pesquisas sobre o reaproveitamento dos resíduos do palmito têm evidenciado múltiplas possibilidades de aplicação. Zenni, Helm e Tavares (2018) avaliaram o uso das bainhas medianas como substrato para o cultivo de fungos comestíveis, obtendo produtos alimentares com alto teor de fibras. Já Oliveira (2015) utilizou as bainhas residuais externa, mediana e interna na formulação de produtos de panificação, destacando seu potencial como ingrediente funcional.

A fermentação em estado sólido vem sendo explorada como estratégia biotecnológica para valorizar resíduos da pupunha, resultando em produtos com propriedades nutricionais aprimoradas. Timm et al. (2024) utilizaram esse material como substrato para o cultivo de *Lentinula edodes*, obtendo biomassa com elevado teor de  $\beta$ -glucanas e proteínas, com potencial aplicação na alimentação bovina. De forma semelhante, Duprat (2012) obteve corpos de frutificação nutricionalmente ricos a partir do cultivo de *Pleurotus ostreatus* em resíduos de bainha e folhas de pupunha.

Além do uso alimentar, os resíduos da pupunha têm demonstrado potencial para aplicações industriais e agrícolas. As bainhas internas foram utilizadas tanto como substrato na produção de celulasas e em testes de atividade enzimática (Lima et al., 2020), quanto no desenvolvimento de papéis aplicados em itens como invólucros de talheres, bandejas e porta-copos (Gottardi et al., 2021). Já as bainhas externas foram transformadas em briquetes para geração de energia (Magalhães et



al., 2021b) e avaliadas como matéria-prima para a produção de composto orgânico com função de corretivo agrícola, apresentando resultados promissores quanto à viabilidade técnica (Magalhães et al., 2021a).

As evidências reunidas ao longo dos estudos indicam que os resíduos da pupunha possuem viabilidade como matéria-prima para aplicações industriais, agrícolas e nutricionais, em consonância com os princípios da economia circular. O reaproveitamento desses subprodutos contribui não apenas para a mitigação de impactos ambientais, mas também para impulsionar cadeias produtivas sustentáveis alinhadas aos princípios da bioeconomia e da produção mais limpa.

## 2.2 PRODUÇÃO DA CONSERVA DE PALMITO PUPUNHA

O processamento do palmito pupunha (*B. gasipaes*) para produção de conservas representa uma prática agroindustrial relevante, por permitir maior aproveitamento comercial da espécie, prolongar sua durabilidade pós-colheita e assegurar padrões de qualidade e segurança alimentar.

Essa cadeia produtiva inicia-se no campo, com a colheita das plantas na idade fisiológica adequada, geralmente a partir de 15 meses de cultivo, podendo estender-se até aproximadamente 36 meses, a depender das condições edafoclimáticas e do manejo adotado (EMBRAPA, 2021). O corte deve atender a critérios técnicos relacionados à altura e ao diâmetro do estipe, sendo seguido de uma pré-limpeza, etapa em que parte das bainhas externas é retirada para reduzir o volume transportado (Resende et al., 2009).

Parte dos resíduos gerados permanece no local da colheita, podendo contribuir para a ciclagem de nutrientes do solo, enquanto outra fração pode ser removida ou destinada a diferentes formas de manejo, a depender das práticas adotadas pela propriedade (Helm et al., 2021).

Na agroindústria, os palmitos são recebidos, separados e identificados em lotes, procedimento essencial para assegurar a rastreabilidade da produção. Quando não ocorre processamento imediato, recomenda-se a manutenção sob refrigeração entre 1 °C e 5 °C. Em seguida, realiza-se a limpeza, na qual as bainhas remanescentes são removidas até que se revele o creme do palmito, fração central de textura mais tenra e destinada ao consumo. Posteriormente, o produto passa ao corte e à categorização, que estabelece os padrões de tamanho, como toletes,

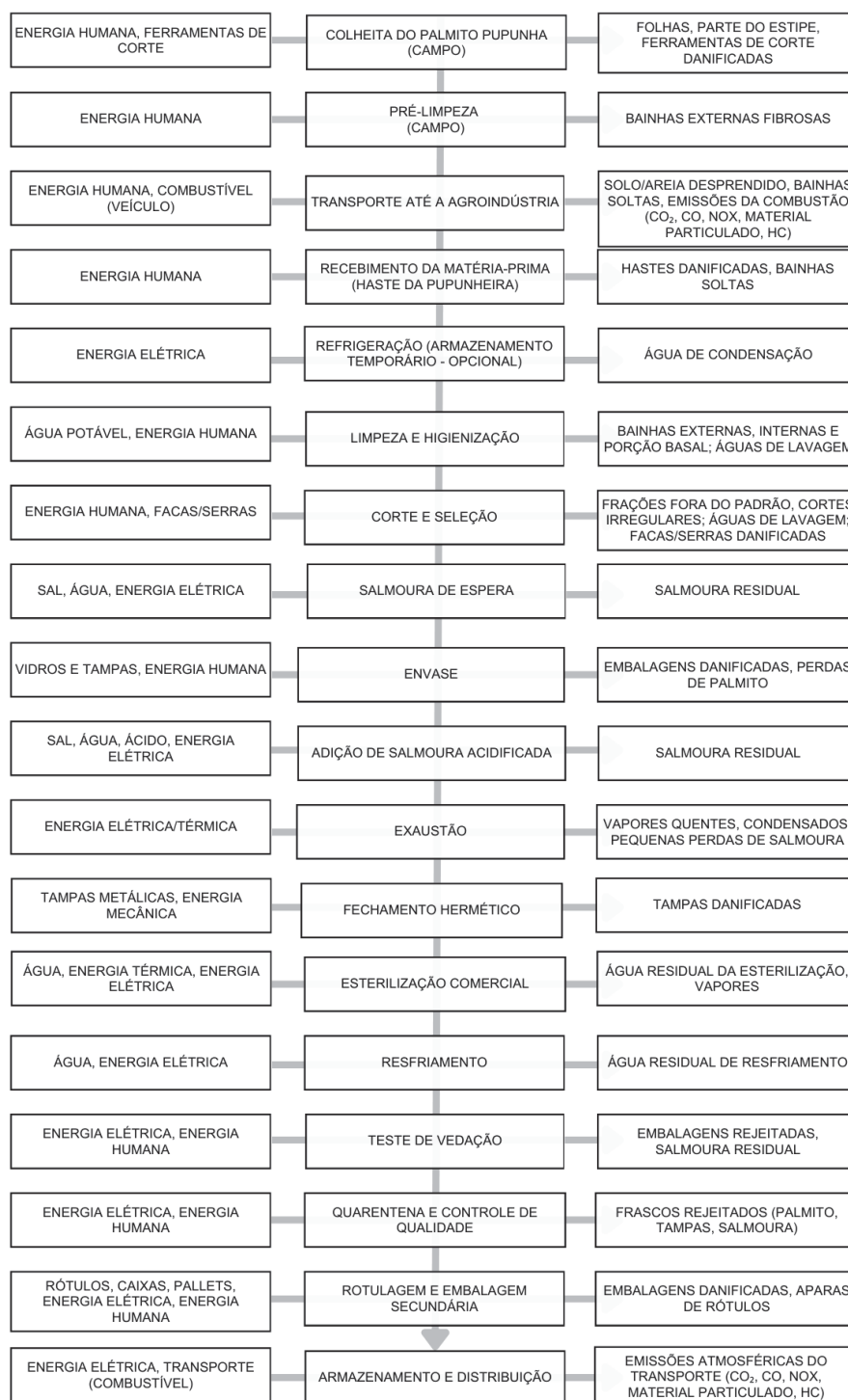
rodela ou ponta, de acordo com a demanda do mercado (Helm et al., 2021; Resende et al., 2009).

O processamento propriamente dito tem início com a imersão em salmoura de espera, procedimento que retarda o escurecimento enzimático e minimiza perdas sensoriais e nutricionais. Na sequência, o palmito é acondicionado em frascos de vidro previamente higienizados e recebe a adição de salmoura acidificada, solução composta por água, sal e ácido cítrico ou láctico, os quais atuam como agentes conservantes. A etapa seguinte envolve a exaustão e o fechamento hermético, responsáveis pela retirada de gases residuais e pela manutenção da vedação. Por fim, realiza-se a esterilização comercial, mediante tratamento térmico capaz de inativar microrganismos e garantir a estabilidade do produto durante o armazenamento (Resende et al., 2009; Monteiro et al., 2002).

Concluída a esterilização, os frascos passam por resfriamento e testes de vedação, a fim de verificar possíveis deficiências no fechamento. Na etapa subsequente, adota-se um período de quarentena, durante o qual amostras representativas são analisadas em laboratório para confirmar a segurança microbiológica do lote. Após essa fase, procede-se à rotulagem, que deve estar em conformidade com a legislação brasileira vigente, seguida do armazenamento e transporte sob condições controladas, garantindo vida de prateleira de até 24 meses (Helm et al, 2021; Resende et al., 2009).

Em síntese, a produção de conserva de palmito pupunha compreende um conjunto articulado de etapas, da colheita ao envase, passando pela higienização, corte, adição de salmoura, tratamento térmico e rotulagem, que resultam em um alimento seguro, com características sensoriais preservadas e longa vida de prateleira (Figura 1).

FIGURA 1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PRODUÇÃO DA CONSERVA DE PALMITO PUPUNHA



FONTE: A autora (2025).

LEGENDA: Representação das entradas, das etapas de processamento e dos fluxos de resíduos na cadeia produtiva da conserva de palmito pupunha.

### 2.2.1 Resíduos Gerados no Processamento do Palmito Pupunha

O processamento do palmito pupunha gera uma grande quantidade de resíduos, desde a colheita no campo até a etapa de industrialização em conserva (Helm et al., 2021).

Na fase agrícola, os primeiros resíduos são gerados na colheita, onde folhas e parte do estipe permanecem no campo. Em seguida, na pré-limpeza realizada ainda na lavoura, ocorre a remoção das bainhas externas mais fibrosas. Esses resíduos, geralmente deixados no solo, decompõem-se naturalmente, contribuindo com matéria orgânica e nutrientes, embora também podem gerar desafios logísticos quando acumulados em grandes volumes (Helm et al., 2021; Resende et al., 2009).

Na recepção da matéria-prima na agroindústria, a limpeza gera resíduos adicionais, formados principalmente por bainhas, ainda fibrosas e sem uso para o consumo humano (Helm et al., 2021). Esse conjunto de bainhas externas e internas constitui a maior fração residual do processamento, podendo chegar a aproximadamente 13 kg para cada 400 g de palmito comercial produzido (Oliveira, 2015).

Na etapa industrial, corte e classificação geram resíduos menores, como pontas foliares e partes do estipe de diâmetro irregular, fora do padrão de envasamento. Embora geralmente destinados ao descarte, esses fragmentos podem ser aproveitados em preparações culinárias simples ou em formulações alternativas.

Após a esterilização e o fechamento dos frascos, são gerados resíduos líquidos provenientes das soluções salinas acidificadas (salmouras), que resultam em volumes residuais ao final da produção. Essa salmoura é classificada como efluente líquido industrial e requer tratamento adequado antes do descarte em corpos hídricos, devido ao teor de sais e ácidos orgânicos capazes de comprometer a qualidade ambiental (Resende et al., 2009). Há também perdas de materiais de embalagem, como frascos de vidro trincados ou tampas metálicas danificadas, classificados como resíduos sólidos recicláveis. Assim, os principais resíduos do processamento de palmito pupunha são classificados em:

1. Resíduos sólidos vegetais primários: folhas, bainhas externas e internas, porção basal, cascas, parte do estipe e hastes danificadas.
2. Resíduos sólidos vegetais secundários: frações de palmito fora do padrão comercial, pontas e cortes irregulares.

3. Efluentes líquidos: salmouras residuais, águas de lavagem, de esterilização e de resfriamento, água de condensação, vapores e condensados.

4. Resíduos sólidos recicláveis: embalagens danificadas (vidros, tampas, caixas, pallets) e aparas de rótulos.

5. Emissões atmosféricas: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, material particulado e hidrocarbonetos.

Portanto, a identificação clara dos resíduos do processo é essencial tanto para a gestão ambiental quanto para o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento, em consonância com os princípios da economia circular e as políticas de sustentabilidade da agroindústria.

### 2.2.2 Identificação do Resíduo Crítico

As bainhas que envolvem o estipe da pupunha representam o principal resíduo gerado no processamento industrial do palmito em conserva, tanto pelo elevado volume produzido quanto pelas limitações de manejo e aproveitamento, correspondendo a cerca de 70 % da biomassa total da planta (Magalhães et al., 2021a; 2021b; Helm et al., 2021).

Esses resíduos são compostos principalmente por fibras lignocelulósicas, celulose, hemicelulose e lignina, responsáveis por sua rigidez e baixa digestibilidade (Helm et al., 2023a). A fração mais interna das bainhas apresenta elevados teores de amido resistente e de fibras alimentares insolúveis, que podem representar até 50 % em base seca, além de minerais como cálcio, potássio e fósforo. Também há a presença de açúcares simples, como glicose e frutose, em pequenas proporções (Oliveira, 2015).

Ensaio toxicológicos com farinhas obtidas das bainhas de pupunha evidenciaram baixa toxicidade, sugerindo segurança para aplicações alternativas na alimentação humana e animal. A presença de compostos antinutricionais, como taninos e fitatos, foi identificada em níveis reduzidos, insuficientes para representar risco significativo (Oliveira, 2015).

Apesar da baixa toxicidade intrínseca, o grande volume de bainhas descartadas configura um passivo ambiental relevante. Quando acumuladas ou destinadas de forma inadequada, podem sofrer fermentação, com liberação de gases como metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), contribuindo para o efeito

estufa, além de elevar a carga orgânica no solo e em corpos d'água. Esse processo favorece a proliferação de microrganismos indesejáveis, provoca mau odor e atrai vetores biológicos, como insetos e roedores, caracterizando um risco indireto à saúde pública (Oliveira, 2015).

Assim, embora constituam o resíduo mais crítico em termos quantitativos no processamento de pupunha, as bainhas também se destacam como fonte potencial de insumos alternativos, configurando-se como matéria-prima promissora para processos biotecnológicos voltados à sustentabilidade ambiental e à economia circular (Helm et al., 2021).

## 2.3 FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

A fermentação em estado sólido (FES) vem sendo explorada como uma estratégia biotecnológica para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, viabilizando sua conversão em produtos com aplicações nutricionais, zootécnicas e industriais. Entre esses resíduos, os lignocelulósicos, que representam mais de 60 % da fração orgânica descartada globalmente, destacam-se por sua riqueza em celulose, hemicelulose e lignina, componentes amplamente utilizados como substrato no cultivo de fungos filamentosos (Cruz-Moreno et al., 2023; Cortina-Escribano et al., 2020).

Diversos resíduos vegetais já foram validados como substratos eficazes na FES, entre eles palhas de cereais, bagaço de cana-de-açúcar, serragem e materiais oriundos da pupunheira (Kvesitadze et al., 2023; Duprat, 2012; Silva et al., 2007). Além disso, a suplementação com farelo de arroz, associada a sais minerais ou corretivos, pode favorecer o crescimento micelial e contribuir para a melhoria do perfil nutricional dos substratos fermentados (Dedousi et al., 2024; Inyod, Payapanon e Keawsompong, 2022).

Na cadeia produtiva da pupunheira, a bainha interna constitui um subproduto rico em matéria orgânica lignocelulósica, com potencial para a obtenção de ingredientes proteicos e fibrosos. A aplicação da fermentação em estado sólido nesse material, por meio da ação de fungos basidiomicetos, tem se mostrado eficiente na conversão da biomassa em insumos com possíveis aplicações tanto na nutrição humana, a partir da produção de corpos frutíferos de cogumelos comestíveis (Duprat, 2012), quanto na nutrição animal, com a geração de

bioprodutos enriquecidos em proteínas,  $\beta$ -glucanas e fenólicos para formulações de rações de bovinos (Timm et al., 2024).

Dentre as espécies utilizadas no estudo, *P. djamor*, *L. edodes*, *G. lucidum* e *F. sanguineus* destacam-se pela capacidade de produzir enzimas ligninolíticas, responsáveis pela degradação de resíduos lignocelulósicos e pela síntese de metabólitos bioativos de interesse biotecnológico (Cruz-Moreno et al., 2023; Wang et al., 2023; Elhusseiny et al., 2021; Portz et al., 2022). Já *M. titans*, embora menos investigada, apresenta crescimento satisfatório em resíduos agroindustriais e polissacarídeos com propriedades antitumorais, evidenciando seu potencial para futuras aplicações biotecnológicas (Milhorini et al., 2018). Em função da relevância nutricional da biomassa micelial, o perfil de aminoácidos descrito na literatura encontra-se apresentado no Quadro 1.

QUADRO 1 - PERFIL DE AMINOÁCIDOS DESCRITOS PARA OS BASIDIOMICETOS ESTUDADOS

Classificação	Aminoácidos	Ocorrência em basidiomicetos	Ocorrência em alimentos	Funções no humano (pós-ingestão)
Essenciais	Fenilalanina, Histidina, Leucina, Lisina, Metionina, Treonina, Triptofano, Valina, Isoleucina	<i>L. edodes</i> <i>P. djamor</i> <i>G. lucidum</i>	Carnes, ovos, laticínios, leguminosas, cereais integrais.	Síntese proteica, regulação do metabolismo muscular, síntese de colágeno e carnitina, formação de neurotransmissores, energia muscular.
Não essenciais	Ácido aspártico, Ácido glutâmico, Alanina, Glicina, Asparagina, Prolina, Serina	<i>L. edodes</i> <i>P. djamor</i> <i>G. lucidum</i>	Carnes, aves, peixes, ovos, laticínios, legumes, vegetais.	Intermediários metabólicos; precursores de outros aminoácidos; síntese de colágeno; metabolismo de lipídios e ácidos nucleicos.
Condicionalmente essenciais	Arginina, Cisteína, Glutamina, Tirosina	<i>L. edodes</i> <i>P. djamor</i> <i>G. lucidum</i>	Carnes, ovos, laticínios, sementes, nozes, vegetais ricos em proteína.	Defesa antioxidante, transporte de nitrogênio, formação de creatina, síntese de catecolaminas e hormônios tireoidianos.

FONTE: A autora (2025), adaptado de Yu et al. (2023); Cruz-Moreno et al. (2023); El Sheikha et al. (2022); Bach et al. (2017); Balbi et al. (2013); Tirapegui e Rogero (2007); Friedman (1999, 1996).



Os aminoácidos, constituintes fundamentais das proteínas, são considerados indicadores relevantes do potencial nutricional de substratos submetidos à FES. Em fungos, tanto a biomassa micelial quanto os corpos de frutificação apresentam perfis que variam conforme a espécie, a fase de crescimento e o tipo de substrato, enriquecendo o material fermentado com compostos bioativos (Cruz-Moreno et al., 2023; El Sheikha et al., 2022; Ibarurri et al., 2021). Entre os aminoácidos essenciais, leucina, lisina e valina se destacam em espécies como *L. edodes* e *G. lucidum*, com papel central na síntese proteica e no metabolismo energético (Yu et al., 2023; Balbi et al., 2013). Já os não essenciais, como ácido glutâmico e ácido aspártico, aparecem em altas proporções em *G. lucidum* e *P. djamor*, participando de vias metabólicas centrais (El Sheikha et al., 2022; Cruz-Moreno et al., 2023).

Essa diversidade de aminoácidos reforça o potencial nutricional dos basidiomicetos aplicados à FES, embora ainda sejam escassos os estudos quantitativos sobre micélio cultivado em resíduos lignocelulósicos. De forma complementar à avaliação do perfil proteico, a caracterização mineral dos bioprodutos obtidos por fermentação em estado sólido com basidiomicetos, conforme descrito na literatura, evidenciou a presença de minerais de relevância nutricional, cujas funções fisiológicas estão sintetizadas no Quadro 2

QUADRO 2 - FUNÇÕES FISIOLÓGICAS DOS MINERAIS

Mineral	Função fisiológica principal
Fósforo (P)	Formação e manutenção de ossos e dentes; equilíbrio ácido-base; componente estrutural do ATP.
Potássio (K)	Regulação do equilíbrio hídrico, transmissão de impulsos nervosos e contração muscular.
Cálcio (Ca)	Saúde óssea e dentária; coagulação sanguínea; atua como segundo mensageiro em processos celulares.
Magnésio (Mg)	Cofator enzimático em mais de 300 reações; estabiliza ATP; contribui para função neuromuscular e imunológica.
Cobre (Cu)	Cofator de enzimas essenciais ao metabolismo do ferro (citocromo c oxidase, lisil oxidase) e antioxidantes (SOD).
Ferro (Fe)	Transporte de oxigênio (hemoglobina/mioglobina); essencial para o metabolismo energético (citocromos).
Manganês (Mn)	Cofator da enzima superóxido dismutase (Mn-SOD); participa do metabolismo de carboidratos, lipídios e da regeneração tecidual.
Zinco (Zn)	Necessário para síntese de DNA, RNA e proteínas; crescimento, cicatrização, paladar e função imune.

FONTE: A autora (2025), adaptado de: Razzaque et al. (2025); Bach et al. (2017); Falandysz e Borovička (2014); Mallikarjuna et al. (2013).

Os resultados indicam que a incorporação desses minerais à biomassa fermentada potencializa o valor nutricional dos bioprodutos, uma vez que tais elementos exercem funções metabólicas essenciais no organismo humano e animal, incluindo processos relacionados à produção energética, contração muscular, formação de tecidos ósseos, manutenção do equilíbrio hídrico e sistemas de defesa antioxidante.

Nesse contexto, a fermentação em estado sólido da bainha interna da pupunha, utilizando diferentes espécies de basidiomicetos, consolida-se como uma estratégia biotecnológica promissora para o enriquecimento simultâneo em proteínas, aminoácidos e micronutrientes, ampliando o potencial de aplicação nutricional, zootécnica e tecnológica dos substratos valorizados.

## 2.4 BASIDIOMICETOS UTILIZADOS NA FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

Os fungos pertencem ao Reino *Fungi*, grupo de organismos eucarióticos heterotróficos que desempenham papel essencial na decomposição da matéria orgânica e nos ciclos biogeoquímicos. Caracterizam-se por possuírem parede celular composta por quitina e por obterem nutrientes por absorção, a partir da degradação enzimática de substratos orgânicos (Santos, 2015).

Entre os principais filos, destacam-se *Ascomycota* e *Basidiomycota*, que abrangem a maioria das espécies conhecidas de importância ecológica e biotecnológica. O filo *Basidiomycota* compreende fungos capazes de formar corpos frutíferos macroscópicos (basidiocarpos) e esporos denominados basidiósporos, produzidos em estruturas especializadas chamadas basídios (Santos, 2015). Essa divisão inclui gêneros amplamente utilizados em processos biotecnológicos, como *Ganoderma*, *Macrocybe*, *Pleurotus*, *Lentinula* e *Fabiosporus*, reconhecidos pela capacidade de degradar compostos lignocelulósicos e sintetizar metabólitos de interesse nutricional e farmacológico.

O basidiomiceto *G. lucidum*, tradicionalmente conhecido como *Lingzhi* na China e *Reishi* no Japão, é amplamente reconhecido pela capacidade de produzir compostos bioativos, como polissacarídeos e ácidos ganodéricos, com propriedades antioxidantes, imunomoduladoras, anti-inflamatórias e hipolipemiantes (Wadood et al., 2023; Wang et al., 2023; El Sheikha et al., 2022).

Estudos também indicam que sua composição mineral pode variar significativamente de acordo com o tipo de substrato lignocelulósico utilizado, especialmente nos teores de potássio e cálcio (Kurd-Anjaraki et al., 2021). Esses atributos reforçam o potencial nutracêutico e farmacológico da espécie, cuja aplicação vem sendo explorada em diferentes contextos biotecnológicos (Wang et al., 2023; El Sheikha et al., 2022; Kurd-Anjaraki et al., 2021).

O corpo de frutificação seco de *G. lucidum* apresenta perfil proteico composto por 18 aminoácidos, com predominância de não essenciais como ácido glutâmico, ácido aspártico e alanina, que juntos representam uma fração expressiva da composição total. Dentre os essenciais, destacam-se leucina, lisina, valina e isoleucina, em teores compatíveis com alimentos proteicos de alto valor biológico (Zhang et al., 2018). Esses resultados reforçam o potencial de *G. lucidum* como fonte complementar de aminoácidos em dietas funcionais e na formulação de suplementos nutricionais.

*M. titans* é uma espécie comestível de grande porte, nativa da América Tropical, ainda pouco explorada pela literatura científica nacional. No Brasil, os primeiros cultivos experimentais foram registrados em 2003, com destaque para o litoral do Paraná, onde a espécie apresentou boa adaptação a áreas degradadas e solos arenosos (Daniel, 2022). De acordo com a autora, seus corpos frutíferos podem ultrapassar 30 kg de massa fresca, sendo considerados entre os maiores cogumelos conhecidos.

Quando desidratado, o cogumelo apresenta aproximadamente 26 % de proteínas e 53 % de carboidratos em sua composição centesimal, além de compostos fenólicos com atividade antioxidante (Daniel, 2022). Em estudo conduzido por Milhorini et al. (2018), um fucogalactano isolado da espécie demonstrou efeito antimetastático *in vitro*, inibindo a migração de células de melanoma sem provocar citotoxicidade. Apesar desses resultados promissores, ambos os trabalhos ressaltam que ainda se fazem necessárias investigações complementares sobre o cultivo, a composição e os efeitos funcionais desse fungo.

Os fungos do gênero *Pleurotus* são amplamente reconhecidos pela capacidade de colonizar diferentes resíduos agroindustriais, especialmente materiais lignocelulósicos como palhas de arroz, trigo, feijão e resíduos de pupunha, graças à ação de enzimas extracelulares que degradam lignina, celulose e hemicelulose (Silva, Alves e Helm, 2019; Duprat, 2012; Figueiró e Graciolli, 2011).

Entre as espécies do gênero, *P. djamor* destaca-se por apresentar elevada eficiência de colonização em substratos alternativos e perfil nutricional equilibrado, aspectos que reforçam seu potencial para produção em sistemas sustentáveis (Cruz-Moreno et al., 2023; Silva, Alves e Helm, 2019). Além do valor nutricional, estudos recentes com *P. djamor* demonstraram a presença de compostos fenólicos e flavonoides com potenciais efeitos antioxidantes, antimicrobianos e antitumorais, cuja concentração varia conforme o resíduo utilizado no cultivo (Cruz-Moreno et al., 2023).

Segundo Raman et al. (2020), *P. djamor* apresenta perfil proteico composto por aminoácidos essenciais e não essenciais em concentrações relevantes. Entre os não essenciais, destacam-se glutamato, aspartato e arginina, associados a funções estruturais e metabólicas, enquanto os essenciais, como leucina, lisina, valina, isoleucina e treonina, contribuem para processos de crescimento e reparo celular. O estudo ressalta que a presença desses aminoácidos confere ao cogumelo elevado valor nutricional e potencial funcional, reforçando sua aplicabilidade em dietas sustentáveis e alternativas às proteínas de origem animal.

O cogumelo *L. edodes* (shiitake) é amplamente cultivado e consumido em diversas regiões do mundo, com destaque para países asiáticos, onde é tradicionalmente valorizado tanto pelo sabor quanto pelas propriedades funcionais (Gaitán-Hernández, Cortés e Mata, 2014). Com teores variando entre 16 e 21 % de proteínas e 36 a 54 % de fibras alimentares, *L. edodes* destaca-se não apenas pelo elevado valor nutricional, mas também pela presença de metabólitos bioativos relacionados a efeitos imunomoduladores, anticancerígenos e hipocolesterolêmicos (Antunes, Helm e Vaz, 2016; Helm, Coradin e Kestring, 2009).

*L. edodes* também tem sido utilizado na bioconversão de resíduos lignocelulósicos, como palha de trigo e bainhas de pupunha, por meio da fermentação em estado sólido (Timm et al., 2024; Gaitán-Hernández, Cortés e Mata, 2014), resultando em biomassa com alto teor de proteínas e fibras, adequada para formulações de ração animal (Timm et al., 2024).

*L. edodes* apresenta proteínas de elevado valor nutricional, compostas por aminoácidos essenciais como lisina, leucina, valina, isoleucina e treonina, além de não essenciais em maior proporção, como ácido glutâmico, ácido aspártico e arginina (Balbi et al., 2013; Yu et al., 2023). A lisina, em particular, apresenta-se em

alta concentração e desempenha funções relevantes no crescimento e na manutenção do sistema imunológico (Yu et al., 2023).

Estudos realizados tanto com o corpo de frutificação quanto com o micélio demonstram que esses aminoácidos estão presentes em proporções adequadas, evidenciando o potencial da espécie como fonte alternativa de proteínas de alta qualidade (Balbi et al., 2013; Yu et al., 2023).

*F. sanguineus* é um basidiomiceto de coloração avermelhada, reconhecido pela produção de cinabarina, pigmento com atividade antimicrobiana, e pela síntese de enzimas ligninolíticas com potencial aplicação em biotecnologia (Gurgel, 2022). Em experimentos realizados com serragem de *Eucalyptus* sp. como substrato, concentrações entre 10 % e 15 % favoreceram o crescimento micelial e aumentaram a produção do pigmento, demonstrando a viabilidade da espécie no desenvolvimento de corantes naturais e catalisadores enzimáticos sustentáveis (Portz et al., 2022). De forma integrada, os principais metabólitos de interesse nutricional, funcional e tecnológico produzidos pelas espécies avaliadas encontram-se sintetizados no Quadro 3.

QUADRO 3 - PRINCIPAIS BIOCOMPOSTOS ASSOCIADOS ÀS ESPÉCIES DE BASIDIOMICETOS UTILIZADAS NA FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

Espécie	Biocompostos produzidos	Referências
<i>G. lucidum</i> ( <i>Reishi/ Lingzhi</i> )	Polissacarídeos (ganoderanos) Triterpenos (ácidos ganodéricos)	El Sheikh et al (2022) Kurd-Anjaraki et al. (2021) Rakhee et al. (2017)
<i>M. titans</i> (Cogumelo gigante)	Compostos fenólicos Fucogalactanas (fucose e galactose)	Daniel (2022) Milhorini et al. (2018)
<i>P. djamor</i> (Cogumelo rosa)	Compostos fenólicos Flavonoides Taninos Enzimas ligninolíticas	Cruz-Moreno et al. (2023) Raman et al (2020)
<i>L. edodes</i> (Shiitake)	Lentinan ( $\beta$ -glucano) Compostos fenólicos Enzimas ligninolíticas	Gaitán-Hernández, Cortés e Mata (2014) Timm et al. (2024)
<i>F. sanguineus</i> (Orelha-de-pau)	Cinabarina (antimicrobiano) Lacases Peroxidases	Portz et al. (2022) Gurgel (2022)

FONTE: A autora (2025), adaptado de: Timm et al. (2024); Cruz-Moreno et al. (2023); El Sheikh et al. (2022); Daniel (2022); Portz et al. (2022); Gurgel (2022); Kurd-Anjaraki et al. (2021); Milhorini et al. (2018); Rakhee et al. (2017); Gaitán-Hernández, Cortés e Mata (2014).

As espécies fúngicas discutidas até aqui demonstram elevado potencial para a conversão de resíduos agroindustriais em produtos com aplicações nutricionais, funcionais e tecnológicas. A utilização desses microrganismos contribui para o

desenvolvimento de bioprodutos aplicáveis à alimentação, fomenta estratégias produtivas sustentáveis e amplia as alternativas voltadas à promoção da saúde. Entre os fatores determinantes desse potencial, destacam-se os teores proteicos, a composição mineral e a presença dos metabólitos bioativos sintetizados durante a fermentação, que influenciam diretamente a qualidade nutricional e funcional dos produtos obtidos.

## 2.5 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: ASPECTOS LEGAIS E REGULATÓRIOS

No âmbito da legislação ambiental e sanitária, é essencial distinguir os conceitos de resíduo, subproduto e coproduto. Resíduo sólido corresponde ao material descartado ou submetido à gestão ambiental, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Já o subproduto refere-se ao material resultante de processo produtivo cuja geração não constitui o objetivo principal da atividade, mas que apresenta uso definido e potencial econômico, não sendo juridicamente caracterizado como resíduo quando atendidos critérios técnicos, sanitários e de rastreabilidade. De forma complementar, o coproduto decorre da valorização de resíduos previamente gerados e destinados a novas cadeias produtivas específicas, como a alimentação animal, conforme regulamentação do Ministério da Agricultura (ABNT, 2023; Brasil, 2010c; Brasil, 2018).

A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), reconhece em seu art. 6º, inciso VIII, que os resíduos sólidos reutilizáveis ou recicláveis são bens econômicos de interesse social, com potencial para geração de trabalho, renda e cidadania.

Essa diretriz confere base legal à sua reinserção nas cadeias produtivas, desde que sejam respeitadas as normas vigentes de segurança e qualidade (Brasil, 2010c).

O Decreto nº 7.404/2010, que regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define “reaproveitamento” como o retorno dos resíduos ao ciclo produtivo, por meio de reutilização, recuperação como subproduto ou reciclagem (art. 3º, XII).

Essa definição oferece base técnica e normativa para o uso de subprodutos como estratégia prioritária na valorização de resíduos, alinhando-se aos

fundamentos da economia circular, como o prolongamento do uso de recursos e a reintegração de materiais aos processos produtivos (Brasil, 2010b).

A norma ABNT NBR 17100-1:2023 introduz o conceito de “status de não resíduo”, segundo o qual determinados materiais deixam de ser enquadrados como resíduos quando apresentam uso definido, atendem a exigências técnicas e legais e estão inseridos em sistemas de rastreabilidade. Nessa condição, podem ser reclassificados como insumos ou mercadorias (ABNT, 2023).

Complementarmente, a ABNT NBR 10004-1:2024 estabelece, em seu escopo, que não se aplica a materiais já reconhecidos como subprodutos ou com status de não resíduo. Com isso, reforça a distinção normativa entre resíduos sólidos e materiais reaproveitáveis, ao isentar os subprodutos da classificação de periculosidade atribuída aos resíduos (ABNT, 2024).

No contexto agroalimentar, a Instrução Normativa nº 81/2018 do Mapa define subproduto como o produto ou substância resultante de processo produtivo cujo objetivo não seja a sua produção principal, passível de uso direto na alimentação animal sem processamento adicional além da prática industrial normal, e coproduto como o produto obtido a partir de resíduos sólidos de indústrias alimentícias destinado à alimentação animal. A norma estabelece exigências sanitárias e critérios de rastreabilidade para o registro e uso desses materiais (Brasil, 2018).

Com base na Lei nº 12.305/2010, no Decreto nº 7.404/2010 e nas normas da ABNT, o reconhecimento de um material como subproduto requer o cumprimento de critérios técnicos e legais. Entre eles, destacam-se: a caracterização físico-química e toxicológica do material; a comprovação de um uso industrial ou comercial definido; o atendimento aos limites ambientais, sanitários e de segurança; a existência de um sistema de rastreabilidade que assegure origem e destino; e a emissão de declaração técnica conforme a ABNT NBR 17100-1, formalizando seu status de não resíduo.

Quando esses requisitos são atendidos, o material deixa de ser regulado como resíduo sólido e passa a ser classificado como bem econômico. Essa transição contribui para a redução de impactos ambientais, estimula a inovação e fortalece práticas produtivas alinhadas aos princípios da economia circular.

Neste trabalho, opta-se pelo uso do termo “subproduto” em vez de “resíduo”, em razão do potencial de reaproveitamento do material em novas aplicações. Essa



escolha segue a definição da Instrução Normativa nº 81/2018 do Mapa e o conceito de “status de não resíduo” da ABNT NBR 17100-1:2023, que permite a reinserção de materiais sempre que forem atendidos os critérios legais, técnicos e de rastreabilidade.

## 2.6 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL A BIOPRODUTOS PROTEICOS OBTIDOS POR FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

O termo “bioproduto proteico” ainda não possui uma definição legal unificada na legislação brasileira, sendo sua regulamentação estabelecida de forma setorial, conforme o uso pretendido e as propriedades do produto. No campo científico, entretanto, o conceito de bioproduto é empregado para designar produtos derivados de matérias-primas biológicas renováveis, obtidos por processos industriais ou biotecnológicos, incluindo rotas fermentativas (Thangaraj et al., 2018).

Nesse contexto, a fermentação em estado sólido aplicada à biomassa residual permite a geração de produtos com atributos nutricionais ou funcionais, entre os quais se incluem as micoproteínas associadas à biomassa fúngica formada durante o processo. Dessa forma, o enquadramento regulatório desses produtos deve ser compreendido a partir dos diferentes marcos normativos aplicáveis aos setores agropecuário, alimentício e da saúde, conforme a finalidade de uso pretendida, os quais são apresentados a seguir.

No setor agropecuário, o Decreto nº 10.375/2020, que institui o Programa Nacional de Bioinsumos, define bioinsumo como “produto, processo ou tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana” voltado à produção, armazenamento ou beneficiamento agropecuário.

Essa definição inclui compostos como proteínas, peptídeos e hidrolisados, desde que apresentem interação funcional com sistemas biológicos e atendam aos critérios técnicos estabelecidos pelo Ministério da Agricultura. Quando atuam como agentes ativos, esses compostos podem ser registrados como bioinsumos, conforme a legislação e os requisitos sanitários vigentes (Brasil, 2020c).

Na área da saúde, a Resolução RDC nº 55/2010 da Anvisa regulamenta o registro de medicamentos de origem biológica, incluindo aqueles desenvolvidos por meio de biotecnologia, como cultivo celular e técnicas de DNA recombinante.

Segundo o art. 2º da norma, esses medicamentos compreendem macromoléculas de composição predominantemente proteica, como fatores de crescimento, enzimas e hormônios. Quando a proteína desempenha função terapêutica, sua formulação deve ser registrada como medicamento biológico, atendendo aos requisitos de qualidade, segurança e eficácia estabelecidos pela legislação sanitária brasileira (Brasil, 2010a).

No setor alimentício, em relação às alegações nutricionais, a Resolução RDC nº 54/2012 da Anvisa estabelece que alimentos sólidos só podem utilizar a designação “alto em proteína” quando contiverem pelo menos 12 g de proteína por 100 g.

Além da quantidade, é necessário comprovar a qualidade proteica com base na digestibilidade e no perfil de aminoácidos essenciais, por meio de métodos reconhecidos, como o PDCAAS (Índice de Aminoácidos Corrigido pela Digestibilidade da Proteína), o escore químico ou outros critérios adotados por organismos internacionais (Brasil, 2012).

A Resolução RDC nº 726/2022 da Anvisa regulamenta os ingredientes proteicos de origem vegetal, definidos como frações vegetais com alto teor de proteína, destinadas à formulação de alimentos industrializados.

Segundo o Anexo I da norma, os teores mínimos para uso das denominações na rotulagem são: “isolada” ( $\geq 88\%$ ), “concentrada” ( $\geq 60\%$ ) e “hidrolisada” ( $\geq 25\%$ ). Ingredientes fermentados com teor proteico inferior a esses valores não podem adotar tais classificações, devendo ser identificados de forma descritiva, conforme a espécie e o processo utilizado, como “ingrediente vegetal fermentado de [nome da espécie]” (Brasil, 2022).

Ainda de acordo com a resolução, esses ingredientes devem atender aos critérios de identidade e qualidade estabelecidos, adotando nomenclaturas compatíveis com seu conteúdo proteico. A quantificação deve ser realizada pelo método oficial de Kjeldahl, que converte o teor de nitrogênio total em proteína bruta ( $N \times 6,25$ ), com os resultados expressos com base na matéria seca do ingrediente (Brasil, 2022).

A Resolução RDC nº 839/2023 da Anvisa estabelece que, na ausência de evidências documentais que comprovem o consumo seguro e habitual de determinado ingrediente no Brasil, este deve ser classificado como “novo alimento” ou “novo ingrediente”.

Nessa condição, torna-se obrigatória a submissão prévia à Anvisa para avaliação toxicológica, nutricional e tecnológica, como etapa necessária para autorizar seu uso e comercialização no país (Brasil, 2023).

No segmento da alimentação animal, a Instrução Normativa nº 110/2020 do Mapa estabelece os requisitos para o registro de ingredientes destinados à alimentação animal, incluindo aqueles oriundos de processos agroindustriais classificados como coprodutos, desde que apresentem composição nutricional definida, segurança sanitária e rastreabilidade (Brasil, 2020d).

Considerando o atual marco regulatório, definir tecnicamente os bioprodutos proteicos obtidos por FES é fundamental para garantir segurança jurídica, facilitar o processo de registro e permitir sua inserção em mercados voltados à alimentação, saúde e produção agropecuária.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO VEGETAL

A matéria-prima empregada neste estudo foi obtida em uma agroindústria de palmito pupunha em conserva, localizada no município de Antonina, litoral do estado do Paraná, Brasil. A empresa processa a porção comestível do palmito destinada à conserva e classifica os subprodutos gerados em três categorias: bainha externa, bainha interna e porção basal (Figura 2).

FIGURA 2 - ETAPAS DA PRODUÇÃO DA CONSERVA DE PALMITO PUPUNHA



FONTE: A autora (2025).

LEGENDA: A - Haste de palmito pupunha; B - Bainha externa; C - Bainha interna; D - Porção basal; E - Palmito pupunha pré-processado; F - Palmito pupunha processado (tolete para conserva).

A bainha interna da pupunha é a camada mais jovem e macia que envolve o palmito, localizada logo abaixo das bainhas externas fibrosas. Trata-se de um tecido vegetal com menor grau de lignificação, mais claro, com menor teor de fibras e maior

valor nutricional em comparação às camadas externas (Helm et al, 2021). Para a realização deste estudo, foram coletados aproximadamente 20 kg de bainha interna.

O material foi inicialmente cortado manualmente com faca e, em seguida, triturado em picador forrageiro (Trapp TRF-400), resultando em partículas com tamanho superior a 1 cm. Após o processamento, o material foi acondicionado em sacos plásticos e armazenado em geladeira (Brastemp Frost Free 390), a  $2,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , até o momento do preparo para fermentação. A fração excedente, não utilizada na FES, foi armazenada em sacos plásticos e congelada em freezer (Consul 530), a  $-18 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , para análises futuras.

A umidade da bainha interna *in natura*, antes do processo de FES, foi determinada pelo método de secagem direta em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  (Instituto Adolfo Lutz, 2008).

### 3.2 BASIDIOMICETOS UTILIZADOS NA FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

Para este estudo, foram selecionados cinco gêneros distintos de basidiomicetos, cada um representado por uma espécie, para aplicação no processo de fermentação em estado sólido da bainha interna da pupunha: EF 31 - *Ganoderma lucidum*, EF 67 - *Macrocybe titans*, EF 87 - *Pleurotus djamor*, EF 109 - *Lentinula edodes* e EF 112 - *Fabiosporus sanguineus*. As informações referentes ao código de identificação, espécie, procedência e ano de isolamento de cada fungo encontram-se no Quadro 4.

QUADRO 4 - BASIDIOMICETOS SELECIONADOS PARA A FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

Código Interno	Espécie	Procedência	Ano de Isolamento
EF 31	<i>Ganoderma lucidum</i>	Curitiba (PR, Brasil)	2000
EF 67	<i>Macrocybe titans</i>	Cornélio Procópio (PR, Brasil)	2003
EF 87	<i>Pleurotus djamor</i>	Hong Kong (China)	2009
EF 109	<i>Lentinula edodes</i>	Colombo (PR, Brasil)	2010
EF 112	<i>Fabiosporus sanguineus</i>	Blumenau (SC, Brasil)	2012

FONTE: A autora (2025).

Os isolados utilizados neste estudo encontram-se armazenados na Coleção de Trabalho do Laboratório de Produtos Não Madeiráveis da Embrapa Florestas (Colombo, PR, Brasil), onde são mantidos sob condições controladas para preservação e uso em pesquisas. O acesso ao patrimônio genético envolvido foi devidamente registrado no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen), sob o número A8652BE.

Os microrganismos estavam preservados pelo método de Castellani e foram reativados em placas de Petri descartáveis (90 mm de diâmetro × 15 mm de altura) contendo meio de cultura Batata-Dextrose-Agar (BDA, Sigma-Aldrich, 39 g/L). Em seguida, as placas foram incubadas em câmara tipo BOD (Solab MSM010) por 10 dias, à temperatura de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , sob fotoperíodo de 12 h de luz e 12 h de escuro.

Após a reativação, os isolados tiveram sua pureza micelial confirmada por inspeção visual, sem detecção de contaminações, sendo utilizados como inóculo na fermentação em estado sólido apenas após essa verificação.

### 3.3 PROCESSO DE FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO DA BAINHA INTERNA DE PUPUNHA

O método de fermentação em estado sólido, consistiu em utilizar a bainha interna da pupunha como substrato e os isolados EF 31 - *Ganoderma lucidum*, EF 67 - *Macrocybe titans*, EF 87 - *Pleurotus djamor*, EF 109 - *Lentinula edodes* e EF 112 - *Fabiosporus sanguineus* como agentes de bioconversão. A integridade do cultivo foi monitorada semanalmente, com o objetivo de identificar possíveis contaminações, por meio da comparação com frascos-controle contendo apenas a bainha interna da pupunha, sem adição de inóculo.

Em balança analítica (Marte AS2000C), foram pesados diretamente nos frascos de vidro (8,5 cm de diâmetro × 12,5 cm de altura)  $80 \pm 1$  g de bainha interna da pupunha. Os frascos, previamente lavados e esterilizados a  $121^\circ\text{C}$  e 1 atm por 15 min, foram vedados com tampas plásticas contendo um orifício central de 1 cm, preenchido com chumaço de algodão, permitindo a troca gasosa com o ambiente externo.

Após a preparação, os frascos de vidro contendo o substrato foram tampados e esterilizados em autoclave (Phoenix) a  $121^\circ\text{C}$  e 1 atm, por 15 min. Após a autoclavagem, os frascos foram colocados à temperatura ambiente, e em seguida,

procedeu-se à inoculação dos fungos em cabine de segurança biológica (Esco Class II BSC). Para a inoculação, foram depositados em cada frasco cinco discos de 8 mm de diâmetro, contendo micélio em crescimento ativo, retirados da borda externa de colônias cultivadas em meio Batata-Dextrose-Agar (BDA, Sigma-Aldrich, 39 g/L).

Foram preparados dez frascos para cada tratamento e para o controle, que continha apenas a bainha interna da pupunha, cada frasco correspondendo a uma repetição. Os frascos foram incubados em câmara do tipo BOD (Solab MSM010), à temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com fotoperíodo de 12 h de luz e 12 h de escuro.

Foram retirados dois frascos de cada isolado em intervalos definidos de 15, 30, 45 e 60 dias de incubação. As amostras analisadas corresponderam ao sistema fermentado, constituído pelo substrato sólido associado ao micélio fúngico desenvolvido. Em seguida, foram secas em estufa (Fanem 315 SE) a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 72 h, trituradas em moedor de café (Cadence Di Grano), acondicionadas em frascos plásticos e armazenadas em freezer (Consul 530) a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  para as análises físico-químicas.

### 3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS FERMENTADOS

#### 3.4.1 Determinação de Umidade

A determinação da umidade foi conduzida por meio do método de secagem direta em estufa a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Para isso, cadinhos de porcelana foram previamente secos por 4 h na estufa (Fanem 315 SE), resfriados por 1 h em dessecador com sílica gel e, então, pesados vazios em balança analítica (Shimadzu AUY220).

Na sequência, foram adicionadas 2 g da amostra previamente seca e homogeneizada em cada cadinho, os quais foram novamente levados à estufa, permanecendo por pelo menos 16 h ou até obtenção de massa constante. Após a secagem, os recipientes foram resfriados no dessecador por 1 h e, posteriormente, pesados. As amostras foram analisadas em duplicata biológica, com triplicata analítica de cada frasco ( $n = 6$  por tratamento). Os resultados foram expressos em g/100 g de amostra.



### 3.4.2 Determinação de Cinzas

A análise de cinzas foi realizada conforme o método de resíduo de incineração descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Utilizaram-se cadinhos de porcelana previamente calcinados por 4 h em mufla a 550 °C (Jung), resfriados em dessecador com sílica gel por 1 h e pesados vazios em balança analítica (Shimadzu AUY220).

Posteriormente, 2 g da amostra previamente seca e homogeneizada foram adicionadas aos cadinhos, que passaram por uma etapa inicial de secagem em estufa por 16 h (Fanem 315 SE). Em seguida, foram transferidos novamente à mufla, mantidos a 550 °C por mais 4 h, resfriados por 1 h em dessecador e posteriormente pesados. As amostras foram analisadas em duplicata biológica, com triplicata analítica de cada frasco (n = 6 por tratamento). Os resultados foram expressos em g/100 g de amostra.

### 3.4.3 Determinação de Proteínas

A análise proteica foi realizada segundo o método de Kjeldahl, que compreende três etapas: digestão, destilação e titulação (Instituto Adolfo Lutz, 2008). Na fase inicial, pesaram-se 0,2 g da amostra em balança analítica (Shimadzu AUY220), transferindo-se o material para tubos digestores de 25 × 250 mm. Em seguida, foram adicionados 0,5 g de catalisador (composto por selenito de sódio, sulfato de cobre pentahidratado e sulfato de sódio anidro) e 5,0 mL de ácido sulfúrico concentrado.

Os tubos foram colocados no bloco digestor (Tecnal), com aquecimento gradual de 100 °C até 350 °C, elevando-se a temperatura em incrementos de 50 °C a cada hora. A digestão foi considerada completa quando a solução apresentou coloração azul-esverdeada característica, indicando a conversão do nitrogênio orgânico em sal amoniacal.

Após o resfriamento, adicionaram-se 10 mL de água deionizada aos tubos. Após novo resfriamento, iniciou-se a destilação: os tubos foram acoplados ao destilador de nitrogênio (Lucadema), adicionando-se hidróxido de sódio a 40 % (m/v) até escurecimento da solução. O destilado (50 mL) foi coletado em frasco de Erlenmeyer contendo 5 mL de solução de ácido bórico a 4 % (m/v) e indicador.



Nessa etapa, a amônia liberada foi capturada pela solução ácida de volume e concentração conhecidas.

Por fim, procedeu-se à titulação com ácido clorídrico 0,1 mol/L, até mudança de coloração de azul-esverdeado para rosa-avermelhado. A concentração de nitrogênio obtida foi utilizada para o cálculo do teor de proteína, aplicando-se o fator de conversão 6,25. As amostras foram analisadas em duplicata biológica, com triplicata analítica de cada frasco ( $n = 6$  por tratamento). Os resultados foram expressos em g de proteína/100 g de amostra seca.

#### 3.4.4 Determinação de Lipídios

A análise de lipídios foi realizada por extração direta no sistema Soxhlet, conforme descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Inicialmente, 1,0 g da amostra seca foi pesada em balança analítica (Shimadzu AUY220) e colocada em um cadinho de alumínio preenchido com algodão desengordurado embebido em éter etílico P.A.

As amostras foram acondicionadas em cartuchos de celulose e inseridas em tubos reboilers previamente secos em estufa a 105 °C. Em seguida, adicionaram-se 100 mL de éter etílico P.A. aos tubos, que foram acoplados ao extrator de lipídios (Tecnal TE-044), mantido a 60 °C por 90 min.

Finalizado o tempo de extração, o solvente foi recuperado e os tubos passaram por uma nova etapa de secagem em estufa (Fanem 315 SE) a 105 °C por 12 h. Após o resfriamento em dessecador com sílica gel durante 1 h, os tubos foram pesados para determinação do teor de lipídios. A análise foi realizada em duplicata analítica.

#### 3.4.5 Determinação de Fibras Solúveis e Insolúveis

A determinação das fibras solúveis e insolúveis foi realizada segundo o método enzimático-gravimétrico descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Inicialmente, 1,0 g da amostra foi pesada em balança analítica (Shimadzu AUY220) e transferida para um frasco de Erlenmeyer contendo 50 mL de tampão fosfato (pH 6). A amostra foi então incubada em banho Dubnoff (Novatecnica NT32) a 100 °C por 30 min, após adição de 50 µL de  $\alpha$ -amilase.

Finalizada essa etapa, o frasco foi retirado do banho e as paredes internas foram lavadas com 10 mL de água deionizada. Em seguida, adicionaram-se 10 mL de hidróxido de sódio 0,275 mol/L, e o conteúdo foi agitado manualmente. O pH foi ajustado para  $7,5 \pm 0,1$  com auxílio de um pHmetro (Tecnal Tec 5).

A segunda etapa consistiu na adição de 100  $\mu$ L de protease, com nova incubação a 60 °C por 30 min. Após essa fase, adicionaram-se 10 mL de ácido clorídrico 0,325 N e realizou-se novo ajuste de pH para  $4,5 \pm 0,2$ . Na sequência, foram acrescentados 200  $\mu$ L de amiloglicosidase, e a amostra passou por mais uma incubação no banho Dubnoff a 60 °C por 30 min.

Ao final da hidrólise enzimática, o conteúdo foi filtrado a vácuo (Marconi MA053), utilizando cadinhos com celite previamente calcinados e pesados. O material retido nos cadinhos correspondeu à fração insolúvel, enquanto o filtrado contém as fibras solúveis.

Para a precipitação dessas fibras, 200 mL de álcool etílico a 92,8 °GL (a 60 °C) foram adicionados ao filtrado, que permaneceu em repouso por 1 h, coberto com papel alumínio. Em seguida, o conteúdo foi submetido a uma nova filtração com cadinhos contendo celite.

Todos os cadinhos foram secos em estufa (Fanem 315 SE) a 105 °C por 12 h. As análises foram realizadas em duplicata, repetindo-se o processo em duas ocasiões independentes. Em cada repetição, uma amostra foi destinada à determinação do teor de cinzas (item 3.4.2) e a outra à análise de proteínas (item 3.4.3), após a transferência do conteúdo dos cadinhos para o tubo digestor.

#### 3.4.6 Determinação de Carboidratos

A quantificação dos açúcares foi realizada por diferença, conforme metodologia indireta descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Para o cálculo, foram subtraídos da composição centesimal os teores de umidade, lipídios, proteínas, cinzas e fibras alimentares totais (solúveis e insolúveis), considerando-se o valor residual até 100 %, como representativo dos carboidratos não quantificados diretamente.

#### 3.4.7 Determinação do Valor Calórico

O valor calórico foi estimado a partir dos teores de proteínas, lipídios e carboidratos disponíveis, aplicando-se os fatores de conversão de Atwater, conforme Merrill e Watt, 1973.

Para o cálculo, consideraram-se 4 kcal/g para proteínas, 9 kcal/g para lipídios e 4 kcal/g para carboidratos. As fibras alimentares foram desconsideradas, por não contribuírem de forma significativa para o valor energético metabolizável.

#### 3.4.8 Determinação de Minerais

Os teores de cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco foram determinados por espectrometria de absorção atômica (Perkin Elmer AAnalyst 200), conforme a metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974).

A quantificação do potássio foi realizada por fotometria de chama (Quimis), segundo o método proposto por Silva (1999).

O teor de fósforo foi determinado por espectrofotometria UV-Vis (Perkin Elmer), utilizando molibdato de amônio como reagente formador do complexo azul de fosfomolibdato, conforme Nogueira e Souza (2005).

Todas as análises foram conduzidas em duplicata analítica, visando assegurar a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados.

#### 3.4.9 Análise Elementar (Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre)

A análise elementar foi realizada por combustão seca, utilizando o Analisador Elementar (Elementar Vario Macro Cube), conforme instruções do manual técnico do equipamento (Elementar, 2016).

Durante o processo, a amostra foi completamente queimada, e os gases resultantes da combustão ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ ) foram separados por cromatografia e posteriormente quantificados por detector de condutividade térmica.

Para a calibração, empregou-se sulfanilamida, utilizada como padrão orgânico de composição elementar definida. As análises foram conduzidas em duplicata analítica.

### 3.4.10 Análise de Compostos Fenólicos

A quantificação dos compostos fenólicos totais foi realizada pelo método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, conforme metodologia descrita por Singleton e Rossi (1965), com adaptações.

Para o preparo dos extratos, 1,0 g de amostra seca e moída foi submetida à extração com solução hidroalcoólica de etanol a 50 % (v/v), sob agitação em banho de ultrassom (Unique UltraCleaner 1400A) por 30 min à temperatura ambiente.

Após a filtração, uma alíquota do extrato foi reagida com o reagente de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich) e solução de carbonato de sódio 15 % (m/v), completando-se o volume final para 10 mL com água deionizada.

A mistura foi mantida em repouso, protegida da luz por 120 min e a absorbância foi determinada em espectrofotômetro (Shimadzu) a 760 nm.

O teor de compostos fenólicos totais foi expresso em equivalentes de ácido gálico (mg GAE/g de amostra seca), com base em curva padrão construída com diferentes concentrações de ácido gálico (Sigma-Aldrich). As análises foram realizadas em duplicata analítica.

## 3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

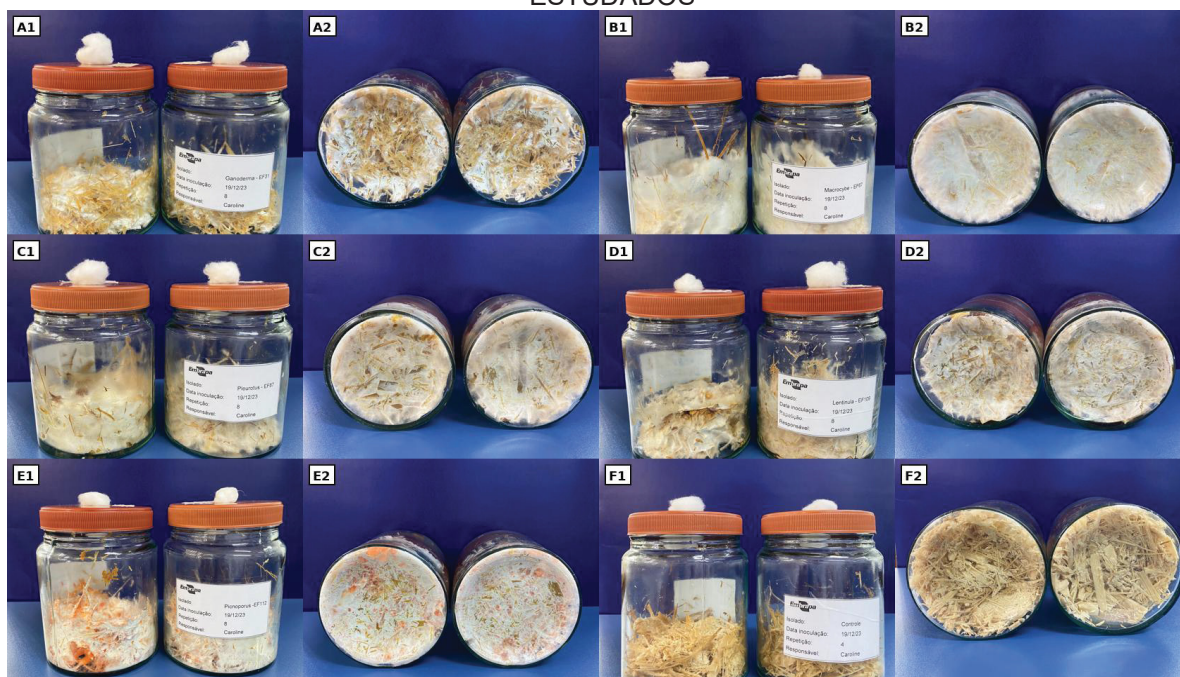
Os resultados foram expressos como médias acompanhadas de seus respectivos desvios padrão. A análise estatística foi realizada no software Origin (2021), por meio de análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey. As diferenças foram consideradas estatisticamente significativas quando  $p < 0,05$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 OBTENÇÃO DOS BIOPRODUTOS PROTEICOS POR FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO

No presente estudo, todos os tratamentos conduzidos na fermentação em estado sólido (FES) apresentaram colonização completa da bacia interna de pupunha ao longo dos 60 dias de incubação, caracterizada pelo recobrimento integral e uniforme do substrato pelo micélio fúngico, conforme ilustrado na Figura 3. Resultados semelhantes foram descritos por Silva, Alves e Helm (2019), que relataram colonização total de *P. djamor* e *L. edodes* em bacias de pupunha submetidas a diferentes pré-tratamentos físicos, sem suplementação nutricional, evidenciando que a composição intrínseca desse resíduo é adequada ao desenvolvimento fúngico, independentemente das variações metodológicas.

FIGURA 3 - COLONIZAÇÃO DA BACIA INTERNA DA PUPUNHA PELOS BASIDIOMICETOS ESTUDADOS



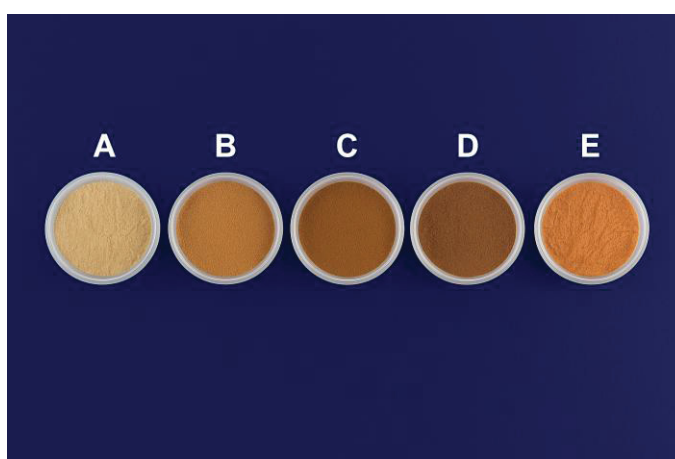
FONTE: A autora (2025)

LEGENDA: Colonização da bacia interna da pupunha por *G. lucidum* (A1, A2), *M. titans* (B1, B2), *P. djamor* (C1, C2), *L. edodes* (D1, D2), *F. sanguineus* (E1, E2) e substrato controle não inoculado (F1, F2).

Nesse contexto, o presente estudo amplia esses resultados ao demonstrar que, mesmo na ausência de qualquer suplementação ou modificação nutricional do substrato, a bainha interna da pupunha é capaz de sustentar não apenas o crescimento micelial, mas também a formação de bioprodutos com elevado potencial biotecnológico. Em contraste, estudos posteriores, como o de Helm et al. (2023b), embora tenham confirmado a viabilidade da biomassa para obtenção de biofarinhas proteicas por meio da bioconversão por *L. edodes*, empregaram suplementação do substrato. Assim, a estratégia metodológica adotada neste trabalho permite isolar a contribuição dos nutrientes intrínsecos da bainha interna, reforçando sua viabilidade como substrato de baixo custo e elevado aproveitamento biotecnológico.

Após 60 dias de incubação, os substratos fermentados originaram os bioprodutos apresentados na Figura 4, os quais exibiram variações de cor e textura em função da espécie de basidiomiceto utilizada, refletindo distintas rotas metabólicas de bioconversão da matriz lignocelulósica. De forma geral, esses resultados evidenciam o bom desempenho das espécies testadas e reforçam o potencial da fermentação em estado sólido como tecnologia viável para a obtenção de ingredientes de valor agregado a partir de um subproduto agroindustrial abundante e sustentável (Helm et al., 2023b)

FIGURA 4 - BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS OBTIDOS POR FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO



FONTE: A autora (2025)

LEGENDA: Bioprodutos proteicos contendo micoproteínas associadas obtidos a partir da fermentação em estado sólido da bainha interna da pupunha por *G. lucidum* (isolado 31), *M. titans* (isolado 67), *P. djamor* (isolado 87), *L. edodes* (isolado 109) e *F. sanguineus* (isolado 112), após 60 dias de incubação.



## 4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E NUTRICIONAL DOS BIOPRODUTOS

As alterações na composição química e nutricional do substrato ao longo da incubação evidenciaram variações estatisticamente significativas nos teores de cinzas e proteínas, refletindo o efeito da atividade micelial no processo de biotransformação. Esses resultados permitem compreender a dinâmica de degradação e síntese de compostos durante a fermentação em estado sólido, destacando o potencial dos basidiomicetos em modificar o valor nutricional do material. A seguir, apresentam-se os resultados das análises físico-químicas, iniciando pela variação do teor de umidade.

No tratamento-controle (sem inoculação fúngica), a umidade final reduziu-se para  $75,45 \pm 4,44$  g/100 g, correspondendo a uma perda de aproximadamente 14,20 % em relação ao valor inicial ( $87,93 \pm 1,41$  g/100 g). Essa diminuição é característica de sistemas de fermentação em estado sólido, nos quais a evaporação da água capilar, fração mais disponível e suscetível à perda, exerce papel determinante no balanço hídrico do substrato (He et al., 2019).

Nos tratamentos inoculados, os teores finais de umidade variaram entre 83,56 e 87,46 g/100 g, sem diferenças estatisticamente significativas entre as espécies após 60 dias de incubação. Os valores médios observados foram de *P. djamor* ( $87,46 \pm 1,52$  g/100 g), *F. sanguineus* ( $87,27 \pm 1,76$  g/100 g), *L. edodes* ( $86,38 \pm 1,63$  g/100 g), *M. titans* ( $85,24 \pm 1,39$  g/100 g) e *G. lucidum* ( $83,56 \pm 0,66$  g/100 g).

Esses resultados sugerem que a colonização micelial contribuiu para a retenção de água ao longo dos 60 dias de incubação. Tal efeito pode estar relacionado à formação de uma cobertura micelial sobre o substrato, que atua como barreira parcial à difusão da umidade e reduz a taxa de evaporação (Manan e Webb, 2016). Além disso, a presença do micélio pode favorecer a retenção da água capilar, fator essencial para a manutenção da umidade disponível e para o crescimento fúngico em fermentações em estado sólido (He et al., 2019).

Após a avaliação da umidade, outro parâmetro de destaque foi o teor de cinzas, monitorado ao longo da incubação (15, 30, 45 e 60 dias), conforme Tabela 1. A análise temporal permitiu observar que os substratos inoculados apresentaram incremento progressivo na concentração mineral em comparação ao controle, que,

ao final dos 60 dias, registrou 7,07 g/100 g (base seca). Dentre os tratamentos, *P. djamor* apresentou o maior teor de cinzas (13,29 g/100 g), seguido por *L. edodes* (11,84 g/100 g), *G. lucidum* (11,79 g/100 g) e *F. sanguineus* (10,67 g/100 g), enquanto *M. titans* resultou no menor valor (8,31 g/100 g).

TABELA 1 - TEOR DE CINZAS (g/100 g EM BASE SECA  $\pm$  DP) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS AO LONGO DA INCUBAÇÃO

Basidiomiceto	15 dias	30 dias	45 dias	60 dias
<i>G. lucidum</i> - EF31	8,79 $\pm$ 0,83 a	10,01 $\pm$ 0,33 b	9,44 $\pm$ 0,41 b	11,79 $\pm$ 0,20 b
<i>M. titans</i> - EF67	6,73 $\pm$ 0,48 b	7,82 $\pm$ 0,27 c	8,30 $\pm$ 0,25 c	8,31 $\pm$ 0,57 d
<i>P. djamor</i> - EF87	9,35 $\pm$ 0,34 a	13,15 $\pm$ 0,30 a	12,32 $\pm$ 0,32 a	13,29 $\pm$ 0,40 a
<i>L. edodes</i> - EF109	7,35 $\pm$ 0,32 b	9,54 $\pm$ 0,47 b	9,91 $\pm$ 0,26 b	11,84 $\pm$ 0,26 b
<i>F. sanguineus</i> - EF112	8,70 $\pm$ 0,41 a	10,20 $\pm$ 0,49 b	9,33 $\pm$ 0,58 b	10,67 $\pm$ 0,37 c

FONTE: A autora (2025)

NOTA: Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, segundo análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

O aumento no teor de cinzas pode ser atribuído à degradação da matéria orgânica durante a fermentação, especialmente de carboidratos e lipídeos, bem como à liberação de compostos voláteis. Como os minerais não são volatilizados, sua concentração relativa tende a aumentar na biomassa residual (Bilal, Niu e Wang, 2024).

A valorização desse parâmetro é relevante, pois a fração mineral reflete a presença de elementos com reconhecidas funções fisiológicas e metabólicas. O fósforo, por exemplo, é fundamental para a produção de ATP e para processos de mineralização óssea; o cálcio e o magnésio participam da manutenção da matriz óssea e da ativação enzimática; e o ferro é indispensável para o transporte de oxigênio e para a resposta imunológica. Esses aspectos têm sido amplamente documentados em estudos sobre saúde humana e composição mineral de alimentos, incluindo cogumelos comestíveis (Razzaque e Wimalawansa, 2025; Mallikarjuna et al., 2013).

Para verificar a eficácia da fermentação, foi monitorado o teor de proteínas ao longo da incubação (Tabela 2), considerando que o objetivo central do processo era obter um bioproduto com maior valor proteico. De maneira geral, os menores teores foram observados aos 15 dias, seguidos por aumentos progressivos até os 60



dias em todos os tratamentos, evidenciando que o tempo de incubação favoreceu o acúmulo de biomassa fúngica.

TABELA 2 - TEOR DE PROTEÍNAS (g/100 g EM BASE SECA  $\pm$  DP) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS AO LONGO DA INCUBAÇÃO

Basidiomiceto	15 dias	30 dias	45 dias	60 dias
<i>G. lucidum</i> - EF31	17,65 $\pm$ 1,49 ab	18,02 $\pm$ 0,50 c	18,64 $\pm$ 0,71 b	21,68 $\pm$ 0,76 bc
<i>M. titans</i> - EF67	13,81 $\pm$ 0,64 c	15,71 $\pm$ 1,22 d	16,03 $\pm$ 0,47 c	18,08 $\pm$ 1,29 d
<i>P. djamor</i> - EF87	18,99 $\pm$ 1,37 a	22,36 $\pm$ 0,67 a	23,99 $\pm$ 1,21 a	25,19 $\pm$ 0,90 a
<i>L. edodes</i> - EF109	13,89 $\pm$ 0,48 c	17,98 $\pm$ 1,06 c	19,51 $\pm$ 0,61 b	23,20 $\pm$ 1,00 b
<i>F. sanguineus</i> - EF112	16,37 $\pm$ 0,32 b	20,32 $\pm$ 0,41 b	18,10 $\pm$ 0,40 b	21,47 $\pm$ 0,84 c

FONTE: A autora (2025)

NOTA: Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, segundo análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

No início do processo (15 dias), *P. djamor* destacou-se com o maior teor proteico (18,99 g/100 g), diferindo estatisticamente de *L. edodes* (13,89 g/100 g) e *M. titans* (13,81 g/100 g), que apresentaram os menores valores. Aos 30 dias, *P. djamor* manteve desempenho superior (22,36 g/100 g), seguido por *F. sanguineus* (20,32 g/100 g), enquanto *M. titans* continuou apresentando valores significativamente mais baixos (15,71 g/100 g). Já em 45 dias, *P. djamor* permaneceu com maior concentração de proteínas (23,99 g/100 g), diferindo estatisticamente dos demais, ao passo que *M. titans* (16,03 g/100 g) manteve os menores valores.

Ao final da incubação (60 dias), *P. djamor* alcançou o teor proteico mais elevado (25,19 g/100 g), em contrapartida, *M. titans* apresentou o menor valor (18,08 g/100 g), ambos mantendo diferença significativa em relação aos demais fungos. Apesar das variações entre espécies, todos os tratamentos superaram o controle (14,18 g/100 g), confirmando a eficiência da fermentação em estado sólido para o enriquecimento proteico do substrato. Essa tendência está em consonância com relatos prévios em *L. edodes*, que evidenciam incremento proteico associado ao crescimento da biomassa fúngica em estágios mais avançados da fermentação (Timm, 2024).

Entre os fungos avaliados, *G. lucidum*, *P. djamor*, *L. edodes* e *F. sanguineus* superaram 20 g/100 g de proteínas, reforçando o potencial dessas espécies para a obtenção de bioprodutos de valor nutricional enriquecido. Com base nesses resultados, as amostras incubadas por 60 dias foram selecionadas para análises adicionais de lipídios, carboidratos, fibras (solúveis e insolúveis) visando caracterizar a composição centesimal (Tabela 3).

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO CENTESIMAL (g/100 g, BASE SECA  $\pm$  DP), COMPOSTOS FENÓLICOS (mg GAE/100 g, BASE SECA  $\pm$  DP) E VALOR CALÓRICO (kcal/100 g, BASE SECA) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS

Parâmetro	Bainha interna	<i>G. lucidum</i> - EF31	<i>M. titans</i> - EF67	<i>P. djamor</i> - EF87	<i>L. edodes</i> - EF109	<i>F. sanguineus</i> - EF112
Cinzas	7,07 $\pm$ 0,15 e	11,79 $\pm$ 0,20 b	8,31 $\pm$ 0,57 d	13,29 $\pm$ 0,40 a	11,84 $\pm$ 0,26 b	10,67 $\pm$ 0,37 c
Proteínas	14,18 $\pm$ 0,70 e	21,68 $\pm$ 0,76 bc	18,08 $\pm$ 1,29 d	25,19 $\pm$ 0,90 a	23,20 $\pm$ 1,00 b	21,47 $\pm$ 0,84 c
Lipídios	0,87 $\pm$ 0,10 a	0,72 $\pm$ 0,21 a	1,07 $\pm$ 0,05 a	1,12 $\pm$ 0,20 a	0,96 $\pm$ 0,12 a	0,97 $\pm$ 0,23 a
Carboidratos	8,45	11,93	16,36	2,57	3,15	8,63
Fibras solúveis	4,07 $\pm$ 2,07 a	3,16 $\pm$ 0,61 a	4,26 $\pm$ 0,05 a	3,03 $\pm$ 1,06 a	4,94 $\pm$ 0,94 a	4,41 $\pm$ 0,90 a
Fibras insolúveis	65,36 $\pm$ 3,10 a	50,71 $\pm$ 0,81 b	51,92 $\pm$ 3,27 b	54,80 $\pm$ 2,01 ab	55,91 $\pm$ 1,68 ab	53,85 $\pm$ 4,61 b
Fibras total	69,43 $\pm$ 5,17 a	53,88 $\pm$ 0,20 b	56,18 $\pm$ 3,21 ab	57,83 $\pm$ 3,07 ab	60,85 $\pm$ 2,62 ab	58,26 $\pm$ 3,71 ab
Compostos fenólicos	65,0 $\pm$ 2,0 c	75,0 $\pm$ 3,0 c	73,0 $\pm$ 1,0 c	169,0 $\pm$ 11,0 a	167,0 $\pm$ 9,0 a	109,0 $\pm$ 2,0 b
Valor calórico	98,35	140,92	147,39	121,12	114,04	129,13

FONTE: A autora (2025).

NOTA 1: Médias seguidas de letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente entre si, segundo análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

NOTA 2: Os teores de carboidratos foram estimados por diferença, com base na composição centesimal. Por se tratar de valor calculado e não diretamente analisado, não se aplica desvio padrão.

Os teores de fibras insolúveis em *P. djamor* e *L. edodes* não diferiram estatisticamente do controle, o que indica manutenção da fração fibrosa do substrato. Em contraste, *G. lucidum*, *M. titans* e *F. sanguineus* apresentaram reduções significativas, resultado que pode estar associado a um perfil enzimático

mais ativo na degradação de componentes lignocelulósicos. Segundo Ibarruri et al. (2021), a ação de enzimas como celulases e hemicelulases é determinante nesse processo, por promover a diminuição das frações fibrosas do substrato. Para as fibras solúveis, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, indicando maior estabilidade dessa fração frente à atividade metabólica dos basidiomicetos.

Em *P. djamor* e *L. edodes*, a expressiva redução dos teores de carboidratos em relação ao controle (2,57 e 3,15 g/100 g, respectivamente) pode indicar sua conversão em proteínas microbianas, favorecendo o acúmulo de biomassa fúngica em função da atividade enzimática dos basidiomicetos, conforme descrito por Bilal, Niu e Wang (2022; 2024) e Ibarruri et al. (2021). Em *F. sanguineus*, que manteve níveis próximos ao controle (8,63 g/100 g), o incremento proteico sugere um balanço igualmente favorável ao metabolismo fúngico.

Já em *G. lucidum* e *M. titans*, a elevação dos carboidratos acompanhada da redução de fibras insolúveis pode refletir a degradação da matriz lignocelulósica e o acúmulo subsequente de açúcares solúveis, com possível contribuição de exopolissacarídeos produzidos em processos fermentativos.

Os teores de lipídios oscilaram entre 0,72 g/100 g e 1,12 g/100 g, sem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Tendência semelhante foi relatada em estudos de FES com basidiomicetos, que evidenciam relativa estabilidade da fração lipídica (Ibarruri et al., 2021).

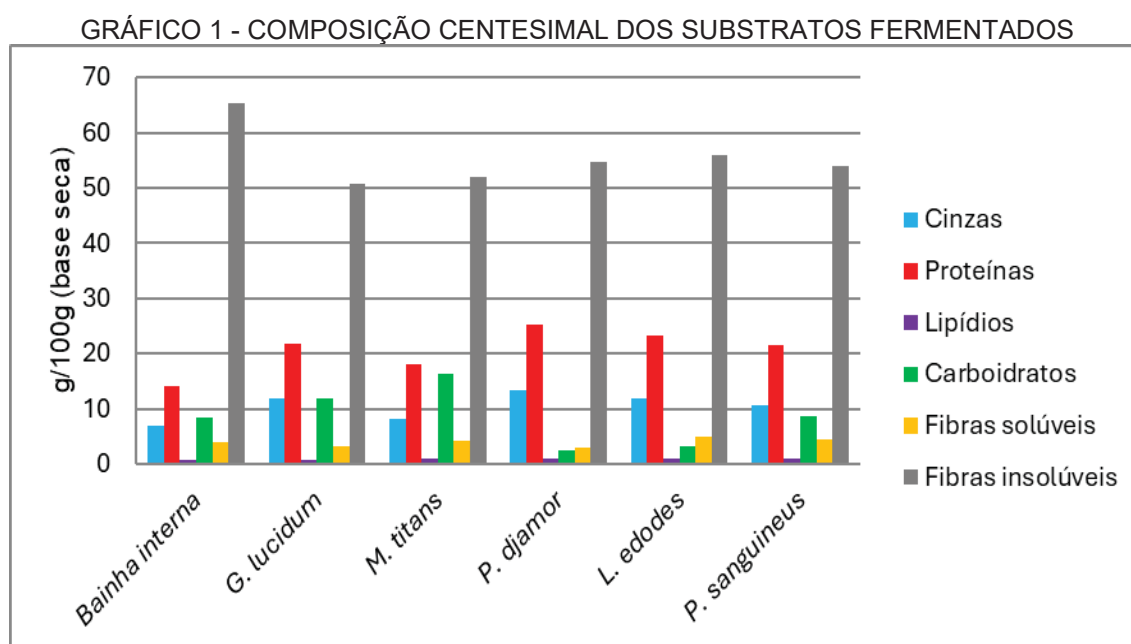
Essa constância pode estar associada ao direcionamento metabólico desses fungos para o uso preferencial de carboidratos e proteínas do substrato, favorecendo a síntese de biomassa micelial em detrimento de rotas lipogênicas (Bilal; Niu; Wang, 2024).

O valor calórico estimado dos substratos fermentados, calculado a partir das frações de proteínas, lipídios e carboidratos disponíveis, e desconsiderando as fibras como fonte energética, variou entre 114,04 e 147,39 kcal/100 g (base seca).

Esses resultados indicam que, mesmo com o acréscimo proteico decorrente da fermentação, os substratos mantêm baixa densidade energética, especialmente em comparação a cereais ou farinhas convencionais. Essa característica está diretamente associada ao elevado teor de fibras insolúveis, que compõem a maior parte da fração centesimal, reduzindo a disponibilidade calórica total.

Do ponto de vista nutricional, o elevado teor de fibra observado confere aos substratos potencial como ingredientes ricos em fibras, com aplicações descritas na literatura para produtos fermentados, particularmente no que se refere à modulação da digestibilidade e à melhoria da biodisponibilidade de nutrientes (Knez et al., 2023).

A caracterização da composição centesimal permitiu avaliar as alterações nos principais macronutrientes ao longo da fermentação. Enquanto a Tabela 3 apresenta os valores numéricos detalhados obtidos para cada parâmetro analisado, o Gráfico 1 foi elaborado com finalidade comparativa e ilustrativa, permitindo a visualização integrada das proporções relativas de proteínas, fibras, lipídios e carboidratos após 60 dias de incubação, bem como a identificação de padrões gerais de enriquecimento proteico entre os tratamentos.



FONTE: A autora (2025).

Com base na Instrução Normativa nº 75/2020 e na RDC nº 429/2020 da Anvisa, que estabelecem os valores de *Ingestão Diária Recomendada* (IDR) para uma dieta de 2.000 kcal, observa-se que os substratos fermentados apresentaram composição nutricional de destaque. Os teores proteicos variaram de 18,08 a 25,19 g/100 g (base seca), correspondendo a aproximadamente 36 a 50 % da ingestão diária recomendada, com destaque para *P. djamor* e *L. edodes*, espécies que apresentaram os maiores valores proteicos. O conteúdo lipídico manteve-se

reduzido ( $\approx 1$  g/100 g), correspondendo a menos de 2 % da IDR, enquanto os carboidratos variaram de 2,57 a 16,36 g/100 g (até 5,5 % da IDR), caracterizando materiais de baixa densidade energética. O teor de fibras totais foi expressivamente elevado, entre 53,88 e 60,85 g/100 g, superando em mais de 200 % o valor de referência diário (25 g) e reforçando o potencial funcional dos bioprodutos.

Os substratos fermentados apresentaram aumentos estatisticamente significativos nos teores da maioria dos minerais avaliados, como fósforo, potássio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco, quando comparados ao controle (Tabela 4). Esse aumento mineral provavelmente resulta da ação enzimática dos basidiomicetos durante a fermentação em estado sólido, favorecendo a quebra da matriz lignocelulósica e a liberação de minerais anteriormente ligados a estruturas vegetais complexas (Falandysz e Borovička, 2014; Mallikarjuna et al., 2013).

TABELA 4 - TEORES DE MINERAIS (MÉDIA  $\pm$  DP) NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS

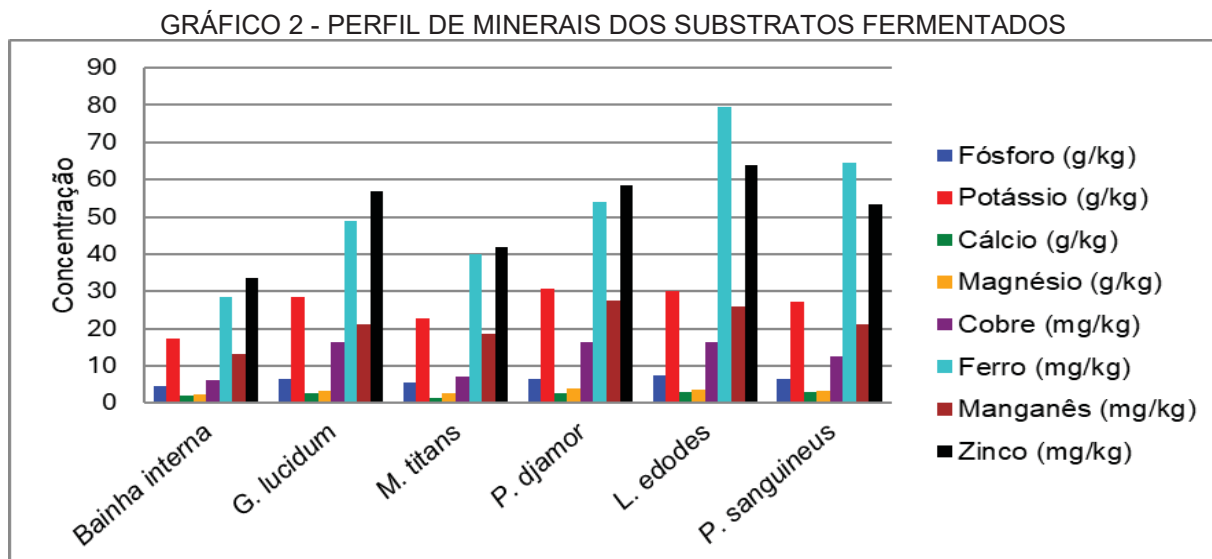
Tratamento	Fósforo (g/ Kg)	Potássio (g/ Kg)	Cálcio (g/ Kg)	Magnésio (g/ Kg)	Cobre (mg/ Kg)	Ferro (mg/ Kg)	Manganês (mg/ Kg)	Zinco (mg/ Kg)
Bainha interna	4,65 $\pm$ 0,00 d	17,15 $\pm$ 0,07 d	1,98 $\pm$ 0,18 b	2,18 $\pm$ 0,04 d	6,00 $\pm$ 1,41 c	28,50 $\pm$ 6,36 c	13,00 $\pm$ 0,00 d	33,50 $\pm$ 0,71 d
<i>G. lucidum</i> - EF31	6,54 $\pm$ 0,15 b	28,60 $\pm$ 1,41 ab	2,68 $\pm$ 0,18 a	3,13 $\pm$ 0,11 b	16,50 $\pm$ 0,71 a	49,00 $\pm$ 1,41 bc	21,00 $\pm$ 0,00 b	57,00 $\pm$ 1,41 b
<i>M. titans</i> - EF67	5,49 $\pm$ 0,06 c	22,60 $\pm$ 0,85 c	1,43 $\pm$ 0,11 c	2,63 $\pm$ 0,18 c	7,00 $\pm$ 1,41 c	40,00 $\pm$ 1,41 bc	18,50 $\pm$ 0,71 c	42,00 $\pm$ 0,00 c
<i>P. djamor</i> - EF87	6,49 $\pm$ 0,07 b	30,70 $\pm$ 0,71 a	2,70 $\pm$ 0,14 a	3,78 $\pm$ 0,11 a	16,50 $\pm$ 0,71 a	54,00 $\pm$ 1,41 b	27,50 $\pm$ 0,71 a	58,50 $\pm$ 2,12 b
<i>L. edodes</i> - EF109	7,29 $\pm$ 0,04 a	30,05 $\pm$ 0,64 ab	3,05 $\pm$ 0,07 a	3,68 $\pm$ 0,04 a	16,50 $\pm$ 0,71 a	79,50 $\pm$ 2,12 a	26,00 $\pm$ 0,00 a	64,00 $\pm$ 1,41 a
<i>F. sanguineus</i> - EF112	6,47 $\pm$ 0,04 b	27,30 $\pm$ 0,14 b	2,88 $\pm$ 0,11 a	3,15 $\pm$ 0,00 b	12,50 $\pm$ 0,71 b	64,50 $\pm$ 13,44 ab	21,00 $\pm$ 0,00 b	53,50 $\pm$ 0,71 b

FONTE: A autora (2025).

NOTA: Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, segundo análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A análise dos teores minerais evidenciou que a fermentação da bainha interna com diferentes basidiomicetos promoveu, de forma geral, enriquecimento nutricional em relação ao controle. Essa tendência é apresentada de forma comparativa no Gráfico 2, que tem por finalidade facilitar a visualização dos padrões

de enriquecimento entre os tratamentos, enquanto os valores numéricos completos encontram-se detalhados na Tabela 4.



FONTE: A autora (2025).

Entre os fungos avaliados, *Lentinula edodes* apresentou os maiores teores de fósforo (7,29 g/kg), cálcio (3,05 g/kg), ferro (79,50 mg/kg) e zinco (64,00 mg/kg). *P. djamor* destacou-se pelo acúmulo de potássio (30,70 g/kg), magnésio (3,78 g/kg) e manganês (27,50 mg/kg), enquanto *F. sanguineus* contribuiu de forma relevante para o aumento de ferro (64,50 mg/kg) e zinco (53,50 mg/kg). *G. lucidum* apresentou valores intermediários em relação aos demais basidiomicetos, e *M. titans* exibiu, em geral, os menores teores minerais, incluindo redução no cálcio (1,43 g/kg) e ausência de incremento significativo no cobre (7,00 mg/kg) em comparação ao controle. Os menores valores foram observados no substrato não fermentado.

Esses resultados indicam que a fermentação em estado sólido é uma estratégia eficaz para a biofortificação mineral da bainha interna da pupunha, com maior potencial de enriquecimento observado nos tratamentos com *L. edodes* e *P. djamor*.

A modulação do perfil mineral variou conforme a espécie fúngica, refletindo a capacidade específica de cada microrganismo em mobilizar e acumular elementos essenciais. Durante a fermentação, a degradação da matriz lignocelulósica favorece a disponibilização de minerais como cálcio (Ca) e magnésio (Mg), que

desempenham papéis centrais na sinalização celular, na contração muscular e no equilíbrio eletrolítico (Razzaque & Wimalawansa, 2025).

Além disso, algumas espécies de fungos demonstraram capacidade de acumular micronutrientes como zinco (Zn) e manganês (Mn), elementos que atuam como cofatores enzimáticos em processos biossintéticos e na degradação da lignina, incluindo a atividade da manganês peroxidase (Falandysz & Borovička, 2014). O ferro (Fe), por sua vez, é essencial para o transporte de oxigênio e para a cadeia respiratória mitocondrial, sendo determinante tanto para o metabolismo fúngico quanto para organismos consumidores (Razzaque & Wimalawansa, 2025).

Além dos minerais, a caracterização foi complementada pela análise elementar (CHNS), possibilitando integrar os dados de composição centesimal e mineral aos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre (Tabela 5).

TABELA 5 - TEORES DE CARBONO, HIDROGÊNIO, NITROGÊNIO, ENXOFRE (%  $\pm$  DP) E RAZÃO C:N NOS BIOPRODUTOS PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS

Tratamento	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre	C:N
Bainha interna	37,06 $\pm$ 0,03 a	6,96 $\pm$ 0,05 a	1,80 $\pm$ 0,06 f	0,17 $\pm$ 0,00 d	21:1
<i>G. lucidum</i> - EF31	36,86 $\pm$ 0,13 a	7,07 $\pm$ 0,04 a	2,92 $\pm$ 0,02 c	0,25 $\pm$ 0,00 c	13:1
<i>M. titans</i> - EF67	36,82 $\pm$ 0,06 a	6,95 $\pm$ 0,02 a	2,25 $\pm$ 0,02 e	0,20 $\pm$ 0,00 d	16:1
<i>P. djamor</i> - EF87	34,86 $\pm$ 0,02 c	7,03 $\pm$ 0,01 a	3,60 $\pm$ 0,04 a	0,33 $\pm$ 0,01 a	10:1
<i>L. edodes</i> - EF109	36,17 $\pm$ 0,07 b	6,67 $\pm$ 0,06 b	3,06 $\pm$ 0,01 b	0,29 $\pm$ 0,00 b	12:1
<i>F. sanguineus</i> - EF112	36,31 $\pm$ 0,04 b	6,70 $\pm$ 0,02 b	2,76 $\pm$ 0,01 d	0,26 $\pm$ 0,01 bc	13:1

FONTE: A autora (2025)

NOTA: Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si, segundo análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os teores de carbono variaram discretamente entre os tratamentos (34,86 - 37,06 %), mantendo-se relativamente estáveis, embora diferenças estatísticas tenham sido registradas, especialmente em *P. djamor*, que apresentou redução significativa em relação ao controle.



O hidrogênio oscilou em faixa estreita (6,67 - 7,07 %), mas apresentou reduções significativas em *L. edodes* e *F. sanguineus* quando comparados ao controle, sugerindo pequenas alterações associadas ao metabolismo fúngico. Em contrapartida, o nitrogênio aumentou de forma significativa em todos os tratamentos, de 1,80 % no controle para até 3,60 % em *P. djamor*, resultado que corrobora estudos anteriores sobre o enriquecimento proteico promovido pela FES (Ibarruri et al., 2021).

Também houve incremento nos teores de enxofre, de 0,17 % para até 0,33 %, fenômeno compatível com a síntese de aminoácidos sulfurados, como metionina e cisteína, descrita em estudos sobre metabolismo microbiano durante a fermentação (Bilal, Niu e Wang, 2024).

Essas alterações refletiram diretamente na razão C:N, que reduziu de 21:1 no substrato controle para valores entre 10:1 e 16:1 nos tratamentos fermentados. Essa diminuição expressiva indica maior concentração de nitrogênio assimilável, condição favorável ao crescimento micelial e à síntese de proteínas e enzimas. Entretanto, relações muito baixas, como a observada em *P. djamor* (10:1), podem favorecer o acúmulo de compostos nitrogenados em níveis potencialmente inibitórios, aspecto já discutido na literatura como fator crítico em processos fermentativos (Dedousi et al., 2024; Ibarruri et al., 2021).

Em síntese, a fermentação em estado sólido modulou de forma consistente a composição elementar da bainha interna do palmito pupunha, promovendo enriquecimento expressivo em nitrogênio e enxofre, elementos diretamente relacionados à síntese de proteínas e aminoácidos sulfurados. Esses resultados confirmam a efetividade do processo na bioconversão do resíduo e reforçam seu potencial como estratégia sustentável para a geração de bioprodutos com valor agregado.

Os resultados obtidos para compostos fenólicos indicam que a fermentação em estado sólido promoveu a liberação de metabólitos bioativos da matriz lignocelulósica, elevando os teores em relação ao substrato controle ( $65,0 \pm 2$  mg GAE/100 g). Entre os tratamentos, destacaram-se *P. djamor* ( $169,0 \pm 11$  mg GAE/100 g) e *L. edodes* ( $167,0 \pm 9$  mg GAE/100 g), que apresentaram valores significativamente superiores aos demais ( $p < 0,05$ ). O bioproduto obtido com *F. sanguineus* ( $109,0 \pm 2$  mg GAE/100 g) apresentou teor intermediário, enquanto *G.*



*lucidum* ( $75,0 \pm 3$  mg GAE/100 g) e *M. titans* ( $73,0 \pm 1$  mg GAE/100 g) não diferiram do controle.

Esses resultados estão em consonância com estudos prévios que descrevem a elevada capacidade de *P. djamor* e *L. edodes* em acumular compostos antioxidantes durante o crescimento micelial (Wang et al., 2020). O incremento observado pode ser atribuído à ação enzimática dos basidiomicetos, especialmente de lacases e peroxidases, capazes de degradar a lignina e favorecer a solubilização de fenólicos ligados (Zhang et al., 2022). Assim, os bioprodutos obtidos apresentam características químicas associadas à atividade antioxidante descrita na literatura, o que sugere potencial de valorização em aplicações alimentares e zootécnicas.

#### 4.3 AVALIAÇÃO FUNCIONAL E APLICAÇÕES POTENCIAIS

A fermentação em estado sólido da bainha interna do palmito pupunha resultou em aumento significativo da qualidade nutricional do substrato, com destaque para o aumento do teor de proteínas, que passou de aproximadamente 14 % no controle para valores entre 18 % e 25 % nos tratamentos inoculados com basidiomicetos. Esse ganho, correspondente a incrementos de 29 % a 79 %, esteve associado à redução da razão carbono:nitrogênio (de 21:1 para 10:1-16:1), indicando conversão eficiente de carboidratos em biomassa fúngica. Tal comportamento reflete a intensa atividade metabólica das espécies e confirma o potencial da FES como processo de enriquecimento proteico natural.

Entre as espécies avaliadas, *P. djamor* e *L. edodes* apresentaram os maiores valores de proteína e minerais, evidenciando desempenho superior na bioconversão do substrato. O aumento simultâneo de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e ferro, acompanhado do enriquecimento em cobre, manganês e zinco, reforça o papel da FES não apenas como técnica de reaproveitamento de resíduos, mas também como ferramenta de produção de biomassa enriquecida em macro e micronutrientes. Esses resultados estão de acordo com estudos prévios que descrevem a correlação entre crescimento micelial, degradação lignocelulósica e aumento do valor nutricional (Bilal, Niu & Wang, 2024; Ibarruri et al., 2021; Dedousi et al., 2024). O Quadro 5 sintetiza os principais aspectos nutricionais e metabólicos dos substratos fermentados.

QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS NUTRICIONAIS E FUNCIONAIS DOS BIOPRODUTOS  
PROTEICOS COM MICOPROTEÍNAS ASSOCIADAS

Espécie	Teor de Proteína (g/100 g)	Minerais predominantes	Processos metabólicos predominantes	Função biotecnológica	Aplicação potencial
<i>G. lucidum</i>	21,68	K, Cu, Fe	Conversão de carboidratos em fibras e proteínas, com elevada atividade ligninolítica e síntese de $\beta$ -glucanas	Estímulo imunológico e propriedades antioxidantes associadas a polissacarídeos e ácidos ganodéricos	Suplementos e formulações nutracêuticas obtidas por fermentação de resíduos agroindustriais
<i>M. titans</i>	18,08	K, Fe, Zn	Metabolização eficiente de carboidratos e lipídios, resultando em biomassa com alta concentração proteica	Produção de compostos fenólicos e polissacarídeos bioativos com potencial antioxidante e antitumoral	Formulações alimentares e suplementos energéticos de base fúngica, com potencial nutracêutico e farmacológico
<i>P. djamor</i>	25,19	K, Ca, Mg, Mn, Zn	Aumento acentuado de proteína e minerais em processos de fermentação de resíduos agroindustriais	Elevação de proteínas e lipídios de alta qualidade, com perfil bioativo e antioxidante	Alimentos de alta densidade nutricional e formulações funcionais, incluindo substitutos de carne
<i>L. edodes</i>	23,20	P, Fe, Zn, Ca, Mg	Aumento de proteínas e minerais, com estabilidade da fração fibrosa durante a FES	Elevado valor proteico, baixo teor lipídico, presença de $\beta$ -glucanas e compostos fenólicos com efeito antioxidante e modulador da fermentação ruminal	Alimentos de alta densidade nutricional e inclusão em rações para bovinos, com manutenção da digestibilidade e potencial mitigação de gases de efeito estufa
<i>F. sanguineus</i>	21,47	Fe	Atividade ligninolítica intensa e produção de enzimas oxidativas (lacases e peroxidases) associadas ao metabolismo do ferro	Degradação de lignina e síntese de pigmentos bioativos (cinabarina), contribuindo para biomassa funcional e antioxidante	Biotransformação de resíduos, produção de pigmentos e suplementos com potencial antianêmico

FONTE: A autora (2025) adaptado de Bilal, Niu e Wang (2024); Dedousi et al. (2024); Timm et al. (2024); Daniel (2022); Ibarruri et al. (2021); Kurd-Anjaraki et al. (2021); Milhorini et al. (2018).

NOTA 1: Os valores de proteína e os minerais destacados são provenientes dos resultados experimentais da presente pesquisa. As informações sobre metabolismo, função e aplicação foram obtidas a partir de dados bibliográficos complementares das respectivas espécies de basidiomicetos.

Assim, a FES aplicada à bainha interna da pupunha consolida-se como uma estratégia biotecnológica viável para a valorização de um resíduo agroindustrial abundante, promovendo ganhos nutricionais e funcionais relevantes. Os resultados obtidos sustentam a viabilidade tecnológica e sustentável da FES para a produção de bioprodutos de interesse nutricional, com potencial de aplicação tanto no setor alimentício quanto no zootécnico, contribuindo para o desenvolvimento de ingredientes inovadores e ambientalmente responsáveis.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES REGULATÓRIAS

Além dos aspectos nutricionais e funcionais discutidos, torna-se essencial avaliar o enquadramento regulatório dos bioprodutos obtidos, de modo a viabilizar sua inserção em cadeias produtivas seguras e em conformidade com as normas brasileiras vigentes.

A fermentação em estado sólido da bainha interna do palmito pupunha promoveu enriquecimento proteico expressivo do substrato, resultando em teores de proteínas entre 18 e 25 g/100 g, valores substancialmente superiores ao controle não fermentado.

Esse incremento permite o enquadramento dos bioprodutos nas diretrizes da Resolução RDC nº 54/2012, que autoriza a alegação nutricional “alto em proteína” para alimentos sólidos que contenham, no mínimo, 12 g/100 g desse nutriente, evidenciando o potencial da FES como estratégia biotecnológica eficiente para a produção de ingredientes proteicos de origem vegetal.

Por outro lado, os bioprodutos não atendem aos critérios e parâmetros tecnológicos estabelecidos pela RDC nº 726/2022 para o uso das denominações “proteína isolada”, “concentrada” ou “hidrolisada”, sendo mais adequado seu enquadramento como ingredientes vegetais fermentados de pupunha, categoria que reconhece sua origem biotecnológica e composição mista de proteínas, fibras e minerais.

Considerando a ausência de histórico consolidado de consumo humano, esses ingredientes podem, conforme a RDC nº 839/2023, requerer avaliação

toxicológica e nutricional para registro como “novo ingrediente”, assegurando sua inocuidade e viabilidade tecnológica antes da comercialização.

No âmbito agropecuário, o Decreto nº 10.375/2020, que institui o Programa Nacional de Bioinsumos, estabelece diretrizes para o fomento e a valorização de produtos e processos de origem biológica voltados à agricultura, à pecuária e à produção florestal, com as quais a fermentação da bainha interna da pupunha se mostra conceitualmente alinhada, em função de sua origem biotecnológica e do enriquecimento nutricional promovido.

De forma complementar, a Instrução Normativa nº 81/2018 do MAPA define critérios para o enquadramento de subprodutos e coprodutos destinados à alimentação animal, categoria compatível com os resultados obtidos neste estudo, especialmente no que se refere à composição nutricional e ao potencial de uso zootécnico.

Em conjunto, essas diretrizes regulatórias sustentam o reconhecimento da bainha interna fermentada como um bioproduto proteico de uso potencial em alimentos, rações e bioinsumos, em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e com as normas ABNT NBR 17100-1:2023 e NBR 10004-1:2024, voltadas à classificação e valorização de resíduos agroindustriais.

Assim, a caracterização da bainha interna fermentada extrapola o âmbito científico, assumindo relevância regulatória, tecnológica e socioambiental. A articulação entre os resultados experimentais e o arcabouço normativo brasileiro indica que os bioprodutos obtidos por fermentação em estado sólido apresentam potencial de enquadramento em diferentes categorias legais, ampliando suas possibilidades de uso e contribuindo para estratégias de economia circular e segurança alimentar.

O Quadro 6 sintetiza as principais normas aplicáveis aos bioprodutos proteicos estudados, demonstrando que a fermentação em estado sólido viabiliza seu enquadramento regulatório como insumo valorizado, ampliando suas possibilidades de aplicação e uso sustentável.

QUADRO 6 - SÍNTESE NORMATIVA APLICÁVEL AOS BIOPRODUTOS PROTEICOS ESTUDADOS

Legislação	Escopo principal	Exigência central	Implicação para este estudo
ABNT NBR 10004-1:2024	Classificação de resíduos sólidos	Exclui materiais já reconhecidos como subprodutos ou com status de 'não resíduo'.	Fundamenta a distinção entre resíduos e subprodutos valorizados pela FES.
ABNT NBR 17100-1:2023	Status de 'não resíduo'	Material deixa de ser resíduo quando tem uso definido, atende requisitos técnicos/legais e possui rastreabilidade.	Possibilita classificar os substratos fermentados como insumos em vez de resíduos.
Decreto nº 10.375/2020 (Bioinsumos)	Programa Nacional de Bioinsumos	Define bioinsumo como produto/processo de origem vegetal, animal ou microbiana.	Bioprodutos proteicos podem ser enquadrados como bioinsumos desde que destinados ao uso agropecuário.
Decreto nº 7.404/2010	Regulamenta a PNRS	Define 'reaproveitamento' (reutilização, reciclagem, subprodutos).	Permite enquadrar a FES como tecnologia de reaproveitamento produtivo.
IN nº 110/2020 do Mapa	Alimentação animal	Estabelece critérios para registro, composição, segurança e rotulagem de ingredientes para ração	Possibilita enquadrar os bioprodutos como ingrediente para ração, desde que atendidos os requisitos mínimos
IN nº 81/2018 do Mapa	Agroalimentar – subprodutos	Define subproduto como material incidental que pode ser destinado a novos usos, desde que com rastreabilidade e segurança.	Respalda o termo 'subproduto' para a bainha interna fermentada.
Lei nº 12.305/2010 (PNRS)	Política Nacional de Resíduos Sólidos	Reconhece resíduos reutilizáveis/recicláveis como bens econômicos de interesse social.	Fundamenta o aproveitamento da bainha interna como insumo de valor econômico.
RDC nº 54/2012 da Anvisa	Alimentos – alegações nutricionais	'Alto em proteína' somente $\geq 12$ g/100 g e desde que atendidos os critérios de qualidade proteica previstos na norma.	Todos os tratamentos atendem ao critério 'alto em proteína'.
RDC nº 55/2010 da Anvisa	Medicamentos biológicos	Regula macromoléculas proteicas de função terapêutica.	Aplicável apenas se houver destinação farmacêutica.
RDC nº 726/2022 da Anvisa	Ingredientes proteicos vegetais	Define denominações (isolada, concentrada, hidrolisada) e teores mínimos (88 %, 60 %, 25 %).	Bioprodutos com menor teor proteico ou sem processo de hidrólise comprovada devem ser rotulados como 'ingrediente vegetal fermentado de [espécie]'
RDC nº 839/2023 da Anvisa	Novos alimentos/ ingredientes	Exige submissão prévia à Anvisa quando não há histórico de consumo seguro no Brasil.	Possível enquadramento caso se proponha uso humano direto.

FONTE: A autora (2025)

## 5. CONCLUSÕES

A fermentação em estado sólido da bainha interna do palmito pupunha mostrou-se uma estratégia biotecnológica eficiente para a valorização de resíduos agroindustriais, possibilitando a obtenção de biomassa fermentada com composição nutricional enriquecida e interesse potencial para os setores alimentar e zootécnico. A colonização fúngica completa observada nos diferentes tratamentos confirmou a viabilidade da bainha interna como substrato autossuficiente, dispensando a suplementação externa e reforçando seu potencial como matéria-prima de baixo custo, elevada disponibilidade e relevância biotecnológica.

O processo fermentativo promoveu incrementos expressivos nos teores de proteínas, minerais e compostos fenólicos, com destaque para os tratamentos conduzidos com *Pleurotus djamor* e *Lentinula edodes*, que apresentaram os maiores teores de fósforo, ferro e zinco. O aumento dos teores de nitrogênio e enxofre, associado à redução da razão C:N, indica o enriquecimento proteico da biomassa fermentada e evidencia a eficiência da biotransformação promovida pelos fungos basidiomicetos ao longo do período de incubação.

A fração fibrosa manteve-se elevada (53,88 a 60,85 g/100 g), resultando em bioprodutos de baixa densidade energética (114,04 a 147,39 kcal/100 g) e conferindo características funcionais associadas à saciedade e ao controle do aporte calórico. Esses resultados evidenciam o potencial da fermentação em estado sólido para a geração de biomassa fermentada rica em fibras e proteínas, com propriedades nutricionais e tecnológicas relevantes tanto para formulações alimentares quanto para aplicações zootécnicas.

O perfil mineral enriquecido, aliado aos elevados teores de compostos fenólicos totais (até 169 mg GAE/100 g), reforça o valor funcional e antioxidante dos materiais obtidos, destacando a fermentação em estado sólido como uma rota sustentável de bioconversão de resíduos lignocelulósicos em bioprodutos de maior valor agregado.

Sob a perspectiva técnico-regulatória, os resultados obtidos demonstram aderência e compatibilidade técnica e ambiental da biomassa fermentada com as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pelas normas ABNT NBR 17100-1:2023 e ABNT NBR 10004-1:2024, pela Instrução Normativa nº 81/2018 do MAPA e pela Resolução RDC nº 54/2012 da ANVISA.

Esse enquadramento sustenta a caracterização da biomassa fermentada como subproduto agrícola reaproveitado e coproduto proteico, indicando seu potencial de inserção em cadeias produtivas sustentáveis, sem configurar avaliação de registro ou aprovação regulatória formal.

Por fim, destaca-se que, no escopo do presente estudo, as micoproteínas foram avaliadas de forma associada à biomassa fúngica produzida ao longo do processo fermentativo, não tendo sido realizadas etapas específicas de isolamento ou purificação dessas frações proteicas. Assim, os resultados refletem o enriquecimento proteico global da biomassa fermentada decorrente da colonização e do metabolismo dos fungos basidiomicetos sobre o substrato lignocelulósico. Investigações futuras poderão aprofundar a caracterização dessas micoproteínas, contemplando sua extração e purificação, a análise detalhada do perfil aminoacídico, a digestibilidade, a avaliação de segurança e o desempenho tecnológico, ampliando as possibilidades de aplicação nutricional, zootécnica e industrial dos bioprodutos obtidos e reforçando o papel da biotecnologia na transição para sistemas produtivos mais circulares e resilientes, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 12.



## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, Bruna Borba; HELM, Cristiane Vieira; VAZ, Rogério Saad. *Composição nutricional dos cogumelos Agaricus brasiliensis e Lentinula edodes*. In: EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA FLORESTAS – EVINCI, 15., 2016, Colombo. *Anais do Evento de Iniciação Científica da Embrapa Florestas – EVINCI*. Colombo: Embrapa Florestas, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004-1:2024*: Resíduos sólidos - Classificação - Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. 35 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 17100-1:2023*: Gerenciamento de resíduos - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. 31 p.
- BACH, Fabiane; HELM, Cristiane Vieira; BELLETTINI, Marcelo Barba; MACIEL, Giselle Maria; HAMINIUK, Charles Windson Isidoro. Edible mushrooms: a potential source of essential amino acids, glucans and minerals. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 52, n. 11, p. 2382-2392, 2017.
- BALBI, Maria Eugenia et al. Análise nutricional e perfil aminoacídico de cogumelos shitake (*Lentinus edodes*, Agaricaceae). *Visão Acadêmica*, v. 14, n. 4, p. 49-60, 2013.
- BILAL, Muhammad; NIU, Dandan; WANG, Zhengxiang. Novel enzyme–fermentation process for bioconversion of restaurant food waste into isomaltooligosaccharide- and L-lactic acid-enriched animal feed. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 8, e1326304, 2024.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Instrução Normativa nº 75, de 8 de outubro de 2020. Estabelece as listas de referência de nutrientes e os respectivos valores de ingestão diária recomendada (IDR) para fins de rotulagem nutricional. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 out. 2020a.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 429, de 8 de outubro de 2020. Dispõe sobre a rotulagem nutricional dos alimentos embalados. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 out. 2020b.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 54, de 12 de novembro de 2012. Dispõe sobre o regulamento técnico sobre informação nutricional complementar. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 12 nov. 2012.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 55, de 16 de dezembro de 2010. Dispõe sobre os requisitos mínimos para o registro de produtos biológicos novos e produtos biológicos no país, visando garantir qualidade, segurança e eficácia. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 dez. 2010a.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 726, de 1º de julho de 2022. Dispõe sobre os requisitos sanitários dos cogumelos comestíveis, dos



produtos de frutas e dos produtos de vegetais. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 1 jul. 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 839, de 14 de dezembro de 2023. Dispõe sobre a comprovação de segurança e autorização de uso de novos alimentos e novos ingredientes. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa SDA/MAPA nº 110, de 24 de novembro de 2020. Publica a lista de matérias primas aprovadas como ingredientes, aditivos e veículos para uso na alimentação animal. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 dez. 2020d.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 81, de 19 de dezembro de 2018. Aprova o regulamento técnico de identidade e qualidade e os procedimentos para uso na alimentação animal de coprodutos da indústria da alimentação humana e animal. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 19 dez. 2018.

BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o programa nacional de bioinsumos. *Diário Oficial da União: Seção 1*, Brasília, DF, 27 mai. 2020c.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a política nacional de resíduos sólidos; cria o comitê interministerial da política nacional de resíduos sólidos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 23 dez. 2010b.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União: Seção 1*, Brasília, DF, 3 ago. 2010c.

CORTINA-ESCRIBANO, Marta et al. Effect of wood residues on the growth of *Ganoderma lucidum*. *Karstenia*, v. 58, n. 1, p. 16-28, 2020.

CRUZ-MORENO, Byanka A. et al. Identification of secondary metabolites of interest in *Pleurotus djamor* using *Agave tequilana* bagasse. *Molecules*, v. 28, n. 2, e557, 2023.

DANIEL, Mayara Carolina. *Estudo da secagem e composição centesimal do cogumelo Macrocybe titans*. 2022. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Processos Químicos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2022.

DEDOUSI, M. et al. Biochemical, functional and antioxidant potential of higher fungi cultivated on agro-industrial residues. Part II: Cultures on mixtures of spent mushroom substrates and mushroom cropping by-products. *Resources, Chemicals and Materials*, v. 3, n. 3, p. 175-187, 2024.

DUPRAT, Mariana Falcão Leal Brotero. *Estudo da produção de Pleurotus ostreatus em resíduos de Bactris gasípaes (Pupunheira)*. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2012.

EL SHEIKHA, Aly Farag et al. Nutritional profile and health benefits of *Ganoderma lucidum* “Lingzhi, Reishi, or Mamentake” as functional foods: current scenario and future perspectives. *Foods*, Basel, v. 11, n. 7, p. 1-29, 2022.

ELEMENTAR Analysensysteme GmbH. *Operating instructions Vario Macro Cube*. Hanau: Elementar, 2009.

ELHUSSEINY, Shaza M. et al. Proteome analysis and in vitro antiviral, anticancer and antioxidant capacities of the aqueous extracts of *Lentinula edodes* and *Pleurotus ostreatus* edible mushrooms. *Molecules*, v. 26, n. 15, e4623, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Açaí*. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/acai>. Acesso em: 14 set. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Operação de corte*. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/pupunha/producao/corte-e-colheita/operacao-de-corte>. Acesso em: 05 dez. 2025.

FALANDYSZ, Jerzy.; BOROVIČKA, Jan. Macro and trace mineral constituents and radionuclides in mushrooms: health benefits and risks. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 97, p. 477–501, 2013.

FIGUEIRÓ, Gláucia Garcia; GRACIOLLI, Luiz Antônio. Influência da composição química do substrato no cultivo de *Pleurotus florida*. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 35, n. 5, p. 924-930, set./out. 2011.

FRIEDMAN, Mendel. Chemistry, nutrition, and microbiology of D-amino acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 47, n. 9, p. 3457-3479, 1999.

FRIEDMAN, Mendel. Nutritional value of proteins from different food sources. A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 44, n. 1, p. 6-29, 1996.

GAITÁN-HERNÁNDEZ, Rigoberto; CORTÉS, Norberto; MATA, Gerardo. Improvement of yield of the edible and medicinal mushroom *Lentinula edodes* on wheat straw by use of supplemented spawn. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 45, n. 2, p. 467-474, 2014.

GODOY, Rossana Catie et al. *Juçara (Euterpe edulis M.): importância ecológica e alimentícia*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2022. 24 p. (Documentos, 372).

GOTTARDI, Fernanda Macedo et al. *Fibras residuais de pupunha: estudo de aplicações ao design sustentável*. In: SIMPÓSIO DE DESIGN SUSTENTÁVEL, 8.,

2021, Curitiba. *Anais do 8º Simpósio de Design Sustentável*. Curitiba: UFPR, 2021. p. 1–11.

GURGEL, Rafaela Araújo Ferreira. *Pycnoporus sanguineus (L.) Murril: um complexo de espécies existente no Neotrópico?* 2022. 127 f. Dissertação (Mestrado em Genética, Conservação e Biologia Evolutiva) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2022.

HE, Qin et al. Humidity control strategies for solid-state fermentation: capillary water supply by water-retention materials and negative-pressure auto-controlled irrigation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 7, e263, p. 1-13, 2019.

HELM, Cristiane Vieira et al. *Método de cultivo axênico de shiitake em substrato com cascas de pupunha*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2023a. (Comunicado Técnico, 488).

HELM, Cristiane Vieira et al. *Palmito pupunha: produtos e subprodutos da agroindústria*. In: *Anais do Seminário sobre Sistemas de Produção de Pupunheira e Palmeira-real-australiana no Sul do Brasil*. Colombo: Embrapa Florestas, 2021. (Documentos, 353).

HELM, Cristiane Vieira et al. *Produção de biofarinha proteica a partir de resíduos de palmito pupunha colonizado por Lentinula edodes*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2023b. (Comunicado Técnico, 487).

HELM, Cristiane Vieira; CORADIN, Juliana Hey; KESTRING, Daiane Rigoni. *Avaliação da composição química dos cogumelos comestíveis Agaricus bisporus, Agaricus brasiliensis, Agaricus bisporus portobello, Lentinula edodes e Pleurotus ostreatus*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2009. (Comunicado Técnico, 235).

IBARRURI, Jone et al. Solid state fermentation as a tool to stabilize and improve nutritive value of fruit and vegetable discards: effect on nutritional composition, *in vitro* ruminal fermentation and organic matter digestibility. *Animals*, v. 11, e1653, 2021.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p. Disponível em: [https://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016\\_3\\_19/analisedealimentosiaI\\_2008.pdf](https://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016_3_19/analisedealimentosiaI_2008.pdf). Acesso em: 29 maio 2025.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL DO PARANÁ (IDR-PARANÁ). *Pupunha para palmito impulsiona desenvolvimento econômico, social e ambiental no litoral paranaense*. 2021. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Noticia/Pupunha-para-palmito-impulsiona-desenvolvimento-economico-social-e-ambiental-no-litoral>. Acesso em: 30 dez. 2024.

INYOD, Tanapak; PAYAPANON, Ahchara; KEAWSOMPONG, Suttipun. The effect of substrates on the production of tropical mushroom *Macrocybe crassa*. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, v. 28, n. 1, eAPST-28-01-02, 2022.

KNEZ, Eliza; KADAC-CZAPSKA, Kornelia; GREMBECKA, Malgorzata. *Effect of Fermentation on the Nutritional Quality of the Selected Vegetables and Legumes and Their Health Effects*. *Life*, Basel, v. 13, n. 3, e655, 2023.

KURD-ANJARAKI, Saleh et al. Potential of waste reduction of agro-biomasses through Reishi medicinal mushroom (*Ganoderma lucidum*) production using different substrates and techniques. *Acta Ecologica Sinica*, p. 1-13, 2021.

KVESITADZE, Giorgi et al. *Pretreatment of agro-industrial wastes with basidial fungi strains for effective delignification of lignocellulosic wastes*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (CEST), 18., 2023, Athens. *Anais do International Conference on Environmental Science and Technology*. Athens, 2023.

LIMA, Gabriel Goetten de et al. Enzymatic activities and analysis of a mycelium-based composite formation using peach palm (*Bactris gasipaes*) residues on *Lentinula edodes*. *Bioresources and Bioprocessing*, Curitiba, v. 7, n. 58, p. 1-17, 2020.

MAGALHÃES, Washington Luiz Esteves et al. *Composto orgânico produzido com resíduos da agroindústria do palmito pupunha*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2021a. 9 p. (Comunicado Técnico, 473).

MAGALHÃES, Washington Luiz Esteves et al. *Método de produção e estudo de caso de briquetes obtidos pela compactação de resíduo de pupunha*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2021b. 10 p. (Comunicado Técnico, 466).

MALLIKARJUNA, S. E. et al. Mineral composition of four edible mushrooms. *Journal of Chemistry*, v. 2013, n. 1, e805284, 2013.

MANAN, Musaalbakri Abdul; WEBB, Colin. Water retention value: a study model-based by *Aspergillus awamori* and *Aspergillus oryzae* embrace three models of solid substrate. *Journal of Life Sciences*, v. 8, p. 420-429, 2016.

MAYER, Sandra Lucia Soares et al. Avaliação tecnológica da biomassa residual de pupunheira para a produção de bioenergia. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 35, n. 4, p. 549–561, out./dez. 2020.

MERRILL, Annabel Laura; WATT, Bernice K. *Energy value of foods: basis and derivation*. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1973. (Agriculture Handbook, n. 74).

MILHORINI, Shayane da Silva et al. Fucogalactan from the giant mushroom *Macrocybe titans* inhibits melanoma cells migration. *Carbohydrate Polymers*, v. 190, p. 50-56, 2018.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). *Palmeira pupunha se destaca como matéria-prima do palmito e na preservação de árvores nativas*. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/palmeira-pupunha-se->

destaca-como-materia-prima-do-palmito-e-na-preservacao-de-arvores-nativas. Acesso em: 14 dez. 2025.

MONTEIRO, Marlene Azevedo Magalhães et al. Estudo químico de alimentos formulados à base de palmito *Bactris gasipaes* H.B.K. (pupunha) desidratado. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 22, n. 3, p. 211–215, set./dez. 2002.

NOGUEIRA, Ana Rita de A.; SOUZA, Gilberto Batista de. *Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos*. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 334 p.

OLIVEIRA, Letícia Freire de. *Resíduo do processamento de palmito de pupunha: estudo físico, químico, tecnológico e toxicológico*. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 25 ago. 2024.

ORIGINLAB CORPORATION. *Origin, versão 2021*. Northampton, MA: OriginLab Corporation, 2021. Software.

PORTZ, Tatiane Martinazzo; MIORANZA, Thaisa Muriel; STANGARLIN, José Renato; KUHN, Odair José. Substrate with lignocellulosic residues for *Pycnoporus sanguineus* cultivation. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 35, n. 2, p. 243–253, abr./jun. 2022.

RAKHEE, Niroj Kumar Sethy et al. Characterization of *Ganoderma lucidum*: phytochemical and proteomic approach. *Journal of Proteins and Proteomics*, v. 8, n. 1, p. 25–33, 2017.

RAMAN, Jegadeesh. et al. Nutritional composition and antioxidant activity of pink oyster mushrooms (*Pleurotus djamor* var. *roseus*) grown on a paddy straw substrate. *Journal of Mushrooms*, v. 18, n. 3, p. 189-200, 2020.

RAZZAQUE, Mohammed S.; WIMALAWANSA, Sunil J. Minerals and human health: from deficiency to toxicity. *Nutrients*, v. 17, p. 1-27, 2025.

RESENDE, Josane Maria et al. *Palmito de pupunha in natura e em conserva*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 109 p. (Coleção Agroindústria Familiar).

RODRIGUES, Haroldo Silva et al. Genetic variability and progeny selection of peach palm via mixed models (REML / BLUP). *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 39, n. 2, p. 165-173, abr./jun. 2017.



SANTOS, Elisandro Ricardo Drechsler dos. *Material complementar ao livro Sistemática Vegetal I: Fungos*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SANTOS, Luciana Nunes dos; BOLANHO, Beatriz Cervejeira; DANESI, Eliane Dalva Godoy. Gestão ambiental e caracterização de resíduos sólidos de agroindústrias de palmito pupunha do estado do Paraná. *Exacta*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 166-187, jan./mar. 2021.

SARRUGE, José Renato; HAAG, Henrique Paulo. *Análises químicas em plantas*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1974. 56 p.

SILVA, Alisson Henrique Antunes da; ALVES, Guilherme Ricardo Zerati; HELM, Cristiane Vieira. *Produção de micélio de Pleurotus djamor e Lentinula edodes utilizando bainhas de pupunha como substrato*. In: EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2019, Colombo. *Anais do Evento de Iniciação Científica*. Colombo: Embrapa Florestas, 2019.

SILVA, Dirceu Jorge da. *Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos*. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 235 p.

SILVA, Evânia Geralda; DIAS, Eustáquio Souza; SIQUEIRA, Félix Gonçalves; SCHWAN, Rosane Freitas. Análise química de corpos de frutificação de *Pleurotus sajor-caju* cultivado em diferentes concentrações de nitrogênio. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 27, n. 1, p. 72-75, jan./mar. 2007.

SILVA, Paula Porrelli Moreira da. *Utilização do palmito basal de pupunha em alternativa ao palmito foliar, visando aumentar o aproveitamento da palmeira Bactris gasipaes*. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

SINGLETON, Vernon L.; ROSSI, Joseph A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965.

SPACKI, K. C. et al. *Pupunha (Bactris gasipaes Kunth): uma revisão*. In: Agricultura e agroindústria no contexto do desenvolvimento rural sustentável. Curitiba: Científica Digital, 2021. p. 333-346.

THANGARAJ, P. et al. *Bioproducts: biomass to bioproducts - economic and environmental viability*. New Jersey: Rutgers University, 2018.

THE GOOD FOOD INSTITUTE BRASIL. *Estudo regulatório sobre proteínas alternativas no Brasil: fermentação*. São Paulo: GFI Brasil, 2022.

TIMM, Thaynã Gonçalves et al. Peach palm shells (*Bactris gasipaes* Kunth) bioconversion by *Lentinula edodes*: potential as new bioproducts for beef cattle feeding. *Bioresource Technology*, v. 394, e130292, 2024.

TIRAPEGUI, Júlio; ROGERO, Marcelo Macedo. *Metabolismo de proteínas*. In: Fisiologia da nutrição humana: aspectos básicos, aplicados e funcionais. São Paulo: Manole, 2007. p. 69-90.

WADOOD, Syed Abdul et al. A preliminary elemental and isotopic investigation to develop authentication tools for Chinese *Ganoderma lucidum*. *Food Control*, [S. l.], v. 153, e109888, 2023. Corrigendum in: *Food Control*, v. 172, e111210, 2025.

WANG, Wenshuai et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharides improve lipid metabolism against high-fat diet-induced dyslipidemia. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 309, e116321, 2023.

YU, Chang- Xia et al. Composition and contents of fatty acids and amino acids in the mycelia of *Lentinula edodes*. *Food Science & Nutrition*, v. 11, n. 7, p. 4038–4046, 2023.

ZENNI, Rafaely dos Santos; HELM, Cristiane Vieira; TAVARES, Lorena Benathar Ballod. Cascas do processamento de palmito para uso na alimentação humana: uma abordagem socioambiental. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 7, n. 2, p. 276–299, abr./jun. 2018.

ZHANG, Hui et al. Amino acids from *Ganoderma lucidum*: extraction optimization, composition analysis, hypoglycemic and antioxidant activities. *Current Pharmaceutical Analysis*, v. 14, p. 562-570, 2018.