

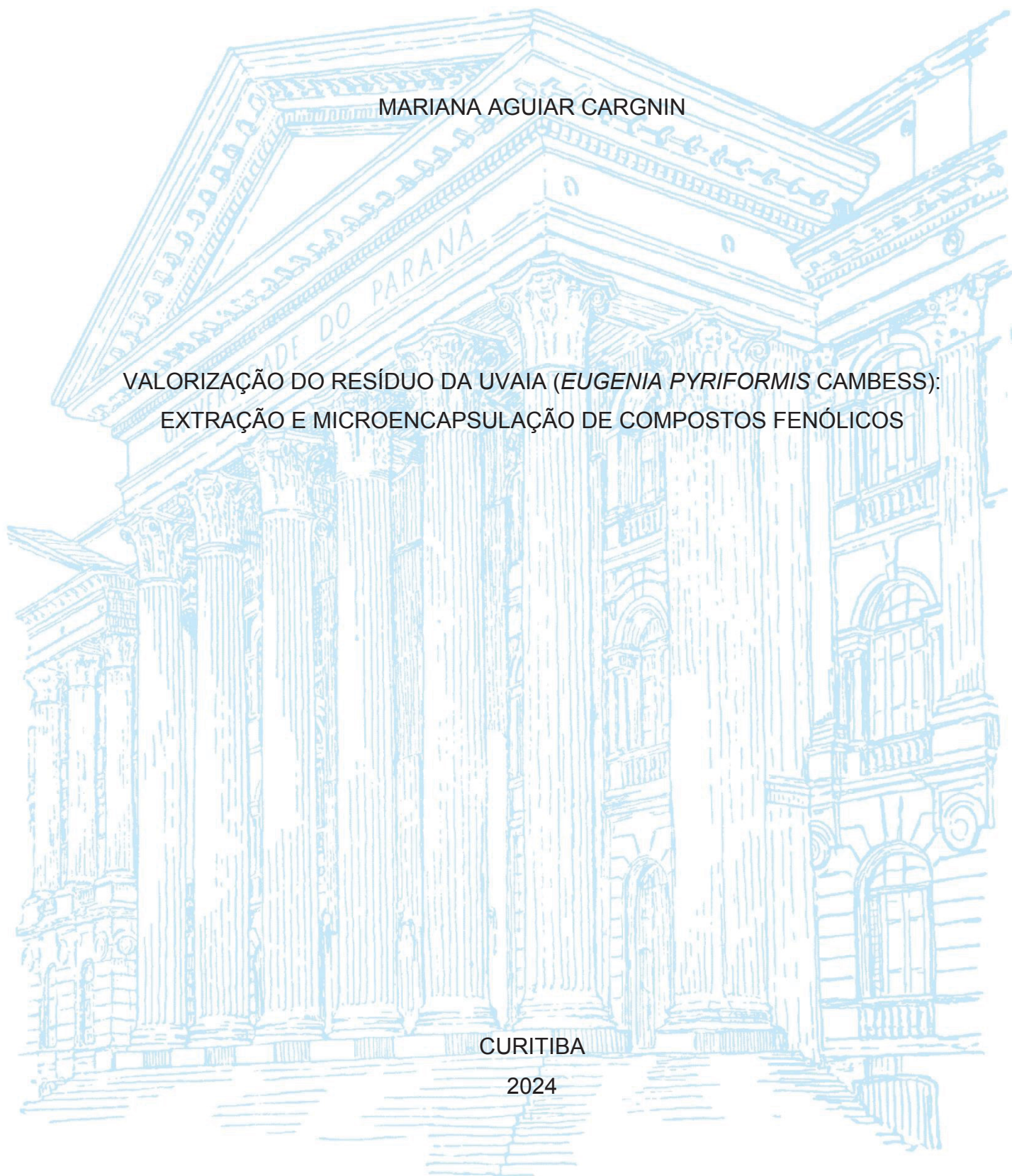
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA AGUIAR CARGNIN

VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DA UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS):
EXTRAÇÃO E MICROENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS

CURITIBA

2024



MARIANA AGUIAR CARGNIN

VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DA UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS):
EXTRAÇÃO E MICROENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de doutora em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Profa. Dra. Franciny Campos Schmidt.

Coorientadora: Profa. Dra. Katia Rezzadori.

CURITIBA

2024

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

Cargnin, Mariana Aguiar

Valorização do resíduo da uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess): extração e microencapsulação de compostos fenólicos / Mariana Aguiar Cargnin. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Franciny Campos Schmidt

Coorientador: Katia Rezzadori

1. Compostos bioativos. 2. Antioxidantes. 3. Uvaia. 4. Microencapsulação. 5. Compostos fenólicos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. III. Schmidt, Franciny Campos. IV. Rezzadori, Katia. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
ALIMENTOS - 40001016019P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE ALIMENTOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MARIANA AGUIAR CARGNIN** intitulada: **VALORIZAÇÃO DO RESÍDUO DA UVAIA (EUGENIA PYRIFORMIS CAMBESS): EXTRAÇÃO E MICROENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS**, 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 doutora 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, 11 de Setembro de 2024.

Assinatura Eletrônica
17/09/2024 11:09:32.0
KATIA REZZADORI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica 07/10/2024 11:15:59.0 GIUSTINO TRIBUZI Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)	Assinatura Eletrônica 18/09/2024 12:20:22.0 JACIANE LUTZ IENCZAK Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)
Assinatura Eletrônica 17/09/2024 14:04:37.0 LÁIS BENVENUTTI Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)	Assinatura Eletrônica 17/09/2024 13:17:55.0 ALESSANDRA CRISTINA PEDRO Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

A uvaia, fruta nativa da Mata Atlântica, é rica em compostos fenólicos com reconhecidas propriedades antioxidantes. Este estudo objetivou valorizar o resíduo da separação da polpa da uvaia através da extração e microencapsulação desses compostos. O resíduo foi analisado *in natura*, seco em estufa e liofilizado, com amostras desidratadas subdivididas em malhas de 14 e 60 *mesh*. Os compostos fenólicos totais foram quantificados pelo método de Folin-Ciocalteu e o perfil fenólico realizado por CLAE. A atividade antioxidante foi avaliada pelos ensaios ABTS⁺, DPPH[•] e FRAP. Para a extração dos compostos fenólicos, testaram-se solventes: água, água acidificada (1% ácido acético) e etanol:água (20:80; 50:50; 80:20 v/v). Compararam-se métodos de extração assistida, como agitação magnética, ultrassom e ultra-homogeneização. Variaram-se a temperatura (30; 40; 50 °C) e a razão amostra/solvente (1:5; 1:10; 1:20; 1:30) para maximizar o conteúdo fenólico extraído. O extrato maximizado foi submetido a ensaios de citotoxicidade em células de fibroblastos HEK293 e câncer de mama MCF-7, com concentrações de 0,25 a 1 mg mL⁻¹. Posteriormente, foi microencapsulado por liofilização com: (1) 25% maltodextrina, (2) 12,5% maltodextrina e 12,5% goma arábica, (3) 20% maltodextrina e 5% inulina e (4) 10% maltodextrina, 10% goma arábica e 5% inulina. Os resultados indicaram que as sementes são a principal fonte de compostos fenólicos do fruto. A granulometria do resíduo influenciou a extração, com partículas menores associadas a maiores concentrações de fenólicos. A liofilização preservou melhor a estrutura do resíduo em comparação com a secagem em estufa. A formulação hidroetanólica a 50% mostrou-se mais eficaz, e os métodos de ultrassom e ultra-homogeneização superaram a agitação magnética. A análise cinética revelou que o tempo de 20 min proporcionou a eficiência máxima. A extração assistida por ultrassom apresentou como pontos ótimos: temperatura de 50 °C e razão amostra/solvente de 1:10 g mL⁻¹. O extrato apresentou alta concentração de compostos fenólicos (6855 mg EAG 100 g⁻¹ resíduo). Concentrações de até 0,5 mg mL⁻¹ não afetaram a viabilidade das células HEK293, enquanto doses mais elevadas mostraram efeitos citotóxicos. Apenas a concentração mais alta (1 mg mL⁻¹) reduziu a viabilidade de células MCF-7, indicando atividade antitumoral. A CLAE mostrou que o extrato de uvaia contém ácido gálico e procianidina como principais bioativos. As micropartículas apresentaram umidade variando de 1,6 a 2,2% e atividade de água inferior a 0,17, adequadas para inibir crescimento microbiano. A cor das micropartículas reconstituídas foi mais clara que a do extrato, atraente para aplicações alimentícias. A densidade aparente variou entre 0,75 e 0,78 g mL⁻¹ e todas apresentaram solubilidade > 90% e baixa higroscopicidade (11,1 a 11,9 g 100 g⁻¹), indicando boa estabilidade e manuseio. A análise FT-IR confirmou que a microencapsulação preservou as propriedades químicas do extrato, com eficiência de encapsulação de 99%. O extrato e as micropartículas demonstraram atividade antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus*. As técnicas empregadas mostraram-se eficazes na valorização de resíduos agroindustriais, resultando em produtos com propriedades antioxidantes e antimicrobianas, com potencial aplicação em formulações alimentícias, cosméticas e farmacêuticas.

Palavras-chave: compostos bioativos; atividade antioxidante; extração assistida por homogeneizador de alta velocidade; extração assistida por ultrassom; liofilização.

ABSTRACT

Uvaia, a fruit native to the Atlantic Forest, is rich in phenolic compounds with recognized antioxidant properties. This study aimed to valorize the residue from the separation of uvaia pulp through the extraction and microencapsulation of these compounds. The residue was analyzed in natura, dried in an oven, and freeze-dried, with dehydrated samples subdivided into 14 and 60-mesh sizes. Total phenolic compounds were quantified using the Folin-Ciocalteu method, and the phenolic profile was assessed by HPLC. Antioxidant activity was evaluated through the ABTS^{•+}, DPPH[•], and FRAP assays. For the extraction of phenolic compounds, solvents tested included water, acidified water (1% acetic acid), and ethanol (20:80; 50:50; 80:20 v/v). Assisted extraction methods such as magnetic stirring, ultrasonication, and ultra-homogenization were compared. Temperature (30; 40; 50 °C) and the sample/solvent ratio (1:5; 1:10; 1:20; 1:30) were varied to maximize the extracted phenolic content. The maximized extract was subjected to cytotoxicity assays on HEK293 fibroblast cells and MCF-7 breast cancer cells at concentrations ranging from 0.25 to 1 mg mL⁻¹. Subsequently, it was microencapsulated by freeze-drying with (1) 25% maltodextrin, (2) 12.5% maltodextrin and 12.5% Arabic gum, (3) 20% maltodextrin and 5% inulin, and (4) 10% maltodextrin, 10% Arabic gum, and 5% inulin. The results indicated that seeds are the fruit's primary source of phenolic compounds. The particle size of the residue influenced the extraction process, with smaller particles associated with higher concentrations of phenolics. Freeze drying better preserved the structure of the residue compared to oven drying. The 50% hydroethanolic formulation proved the most effective, and ultrasonication and ultra-homogenization methods outperformed magnetic stirring. Kinetic analysis revealed that a time of 20 minutes yielded maximum efficiency. Ultrasound-assisted extraction demonstrated optimal conditions at a temperature of 50 °C and a sample/solvent ratio of 1:10 g mL⁻¹. The extract exhibited a high concentration of phenolic compounds (6855 mg GAE 100 g⁻¹ residue). Concentrations of up to 0.5 mg mL⁻¹ did not affect the viability of HEK293 cells, while higher doses exhibited cytotoxic effects. Only the highest concentration (1 mg mL⁻¹) reduced the viability of MCF-7 cells, indicating antitumor activity. HPLC analysis showed that the uvaia extract contains gallic acid and procyanidin as the main bioactive compounds. The microparticles exhibited moisture levels ranging from 1.6 to 2.2% and water activity below 0.17, suitable for inhibiting microbial growth. The color of the reconstituted microparticles was lighter than that of the extract, making it attractive for food applications. The apparent density ranged between 0.75 and 0.78 g mL⁻¹, and all exhibited solubility > 90% and low hygroscopicity (11.1 to 11.9 g 100 g⁻¹), indicating good stability and handling properties. FT-IR analysis confirmed that microencapsulation preserved the chemical properties of the extract, with an encapsulation efficiency of 99%. The extract and microparticles demonstrated antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus*. The techniques employed proved effective in valorizing agro-industrial waste, resulting in products with antioxidant and antimicrobial properties, with potential applications in food, cosmetic, and pharmaceutical formulations.

Keywords: bioactive compounds; antioxidant activity; high-speed homogenizer-assisted extraction; ultrasound-assisted extraction; freeze-drying.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VISÃO GERAL DA ESPÉCIE <i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS (a), FRUTOS (b) E SEMENTES (c).....	23
FIGURA 2 – PRINCIPAIS CLASSES DE COMPOSTOS FENÓLICOS ENCONTRADOS EM ALIMENTOS	28
FIGURA 3 – COMPOSTOS BIOATIVOS ENCONTRADOS NO RESÍDUO DA SEPARAÇÃO DA POLPA DA UVAIA	30
FIGURA 4 – EXEMPLOS DE ALIMENTOS QUE SE BENEFICIAM DA APLICAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS COMO CONSERVANTES	38
FIGURA 5 – ESQUEMA DAS EXTRAÇÕES ASSISTIDAS POR ULTRASSOM (a) E POR HOMOGENEIZADOR DE ALTA VELOCIDADE (b)	44
FIGURA 6 – ESTRUTURAS QUÍMICAS DA MALTODEXTRINA (a), GOMA ARÁBICA (b) E INULINA (c)	48
FIGURA 7 – ESQUEMA DO <i>SPRAY DRYER</i>	50
FIGURA 8 – ESQUEMA DO LIOFILIZADOR	52
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA GERAL DO ESTUDO	57
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÕES VISUAIS DOS FRUTOS DE UVAIA INTEIROS, RESÍDUOS <i>IN NATURA</i> , SECOS EM ESTUFA E LIOFILIZADOS....	60
FIGURA 11 – ESQUEMA DA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS A PARTIR DO RESÍDUO DE UVAIA.....	68
FIGURA 12 – ESQUEMA DA AVALIAÇÃO DA CITOTOXICIDADE DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA EM CÉLULAS HEK293 E MCF-7	71
FIGURA 13 – ESQUEMA DA MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA	74
FIGURA 14 – METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIMICROBIANA <i>IN VITRO</i> DE MICROPARTÍCULAS E EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA	81
FIGURA 15 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS (a) E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE (b) EM CASCA, POLPA E SEMENTE DE UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS).....	84
FIGURA 16 – MICROGRAFIAS DE SUPERFÍCIE DOS RESÍDUOS DE UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS) SECOS EM ESTUFA E LIOFILIZADOS	90

FIGURA 17 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS (a) E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE (b) EM RESÍDUOS DE UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS)	91
FIGURA 18 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS DE EXTRATOS DE RESÍDUOS DE UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS) OBTIDOS COM O USO DE DIFERENTES SOLVENTES	94
FIGURA 19 – CURVAS CINÉTICAS DA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DO RESÍDUO DE UVAIA POR EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRA-HOMOGENEIZADOR, EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM E EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR AGITAÇÃO MAGNÉTICA.....	98
FIGURA 20 – MICROGRAFIAS DE SUPERFÍCIE DOS RESÍDUOS DE UVAIA APÓS EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR AGITAÇÃO MAGNÉTICA, EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRA-HOMOGENEIZADOR E EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM.....	100
FIGURA 21 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE COMPOSTOS FENÓLICOS DO RESÍDUO DE UVAIA	102
FIGURA 22 – INFLUÊNCIA DA RAZÃO AMOSTRA/SOLVENTE NA EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE COMPOSTOS FENÓLICOS DO RESÍDUO DE UVAIA	104
FIGURA 23 – ENSAIO DE VIABILIDADE CELULAR EM CÉLULAS DERIVADAS DE TECIDO RENAL EMBRIONÁRIO HUMANO (a) E CÉLULAS DERIVADAS DE CARCINOMA DE MAMA HUMANO (b).....	108
FIGURA 24 – MICROGRAFIAS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDAS POR LIOFILIZAÇÃO UTILIZANDO a) 25% MALTODEXTRINA, b) 12,5% MALTODEXTRINA + 12,5% GOMA ARÁBICA, c) 20% MALTODEXTRINA + 5% INULINA e d) 10% MALTODEXTRINA + 10% GOMA ARÁBICA + 5% INULINA	112
FIGURA 25 – IMAGENS DIGITAIS PARA COMPARAÇÃO DAS CORES ENTRE O EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA E AS MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM	

DIFERENTES ENCAPSULANTES ANTES E APÓS A RECONSTITUIÇÃO	117
FIGURA 26 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DE MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES ENCAPSULANTES	120
FIGURA 27 – ESPECTROS DE FT-IR DE MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES ENCAPSULANTES.....	122
FIGURA 28 – TESTE DE SENSIBILIDADE AOS ANTIMICROBIANOS PELO MÉTODO DE DISCO-DIFUSÃO UTILIZANDO EXTRATO E MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES AGENTES ENCAPSULANTES	126
FIGURA 29 – SIMULAÇÃO DA DIGESTÃO GASTROINTESTINAL <i>IN VITRO</i> DO EXTRATO E DAS MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES AGENTES ENCAPSULANTES.....	130

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA POLPA E DO RESÍDUO RESULTANTE DA SEPARAÇÃO DA POLPA DA UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS)	24
TABELA 2 – COMPOSTOS BIOATIVOS E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DA POLPA E DO RESÍDUO RESULTANTE DA SEPARAÇÃO DA POLPA DA UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS)	26
TABELA 3 – ESTUDOS SOBRE EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DE RESÍDUOS DE FRUTAS DA FAMÍLIA MYRTACEAE REPORTADOS NA LITERATURA.....	41
TABELA 4 – ESTUDOS DE MICROENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS DE FRUTAS POR SECAGEM POR LIOFILIZAÇÃO REPORTADOS NA LITERATURA CIENTÍFICA	54
TABELA 5 – ESTUDOS DE SELEÇÃO DO SOLVENTE PARA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DOS RESÍDUOS DE UVAIA	65
TABELA 6 – ESTUDOS DE SELEÇÃO DO MÉTODO PARA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DOS RESÍDUOS DE UVAIA	66
TABELA 7 – COMPOSIÇÃO DAS FORMULAÇÕES PARA ESTUDOS DE MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA (% EM MASSA DOS MATERIAIS ENCAPSULANTES EM RELAÇÃO AO VOLUME DO EXTRATO).....	72
TABELA 8 – COMPOSIÇÃO CENTESIMAL E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO- QUÍMICA DA UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS) E SEUS RESÍDUOS (CASCA E SEMENTES).....	87
TABELA 9 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE EM EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDO SOB CONDIÇÕES APERFEIÇOADAS	106
TABELA 10 – COMPOSTOS FENÓLICOS QUANTIFICADOS POR CLAE EM EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA	110
TABELA 11 – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS, PARÂMETROS DE COR E PROPRIEDADES DE RECONSTITUIÇÃO DE MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDAS POR	

LIOFILIZAÇÃO USANDO MALTODEXTRINA, GOMA ARÁBICA E/OU INULINA.....	114
---	-----

TABELA 12 – DIÂMETROS DOS HALOS DE INIBIÇÃO PARA DIFERENTES CEPAS BACTERIANAS TESTADAS COM EXTRATO E MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDAS POR LIOFILIZAÇÃO USANDO MALTODEXTRINA, GOMA ARÁBICA E/OU INULINA	127
--	-----

LISTA DE SIGLAS

AA	– Ácido ascórbico
ABTS ^{•+}	– 2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)
AC	– Ácido cítrico
AG	– Ácido galacturônico
AHP	– Amido hidrolisado de pinhão
ANOVA	– Análise de variância
AOAC	– <i>Association of Official Analytical Chemist</i>
BHA	– Hidroxilanisole butilado
BHT	– Hidroxitolueno butilado
BS	– Base seca
BU	– Base úmida
CFT	– Conteúdo fenólico total
CIE	– <i>Commission Internationale de l'éclairage</i>
CLAE–DAD	– Cromatografia líquida de alta eficiência com detector de arranjo de diodos
CV	– Coeficiente de variação
DE	– Dextrose equivalente
DMEM	– Meio de Eagle modificado por Dulbecco
DMSO	– Dimetilsulfóxido
DP	– Grau de polimerização
DPPH [•]	– 2,2-difenil-1-picrilhidrazil
DSC	– Calorimetria exploratória diferencial (DSC)
EAAM	– Extração assistida por agitação magnética
EAG	– Equivalentes de ácido gálico
EAH	– Extração assistida por homogeneizador de alta velocidade
EAU	– Extração assistida por ultrassom
EAU–B	– Extração assistida por ultrassom de banho
EE	– Eficiência de encapsulação
EQ	– Equivalentes de quercetina
EQ	– Equivalentes de quercetina
FBS	– Soro fetal bovino
FC	– Folin-Ciocalteu

FGS	– Fluido gástrico simulado
FIS	– Fluido intestinal simulado
FRAP	– Ensaio do poder antioxidante do ferro
FSS	– Fluido salivar simulado
FT-IR	– Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
GA	– Goma arábica
GT	– Goma tara
HPAF	– Frutanos de Agave de Alto Desempenho
IAL	– Instituto Adolfo Lutz
IBCP	– Institute for the Biology and Chemistry of Proteins
INFOGEST	– <i>Information Network on Functional Gastrointestinal Disorders and Transactions</i>
LTDA	– Limitada
MEV	– Microscopia Eletrônica de Varredura
MTT	– 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazólio brometo
NIH	– National Institutes of Health
NR	– Não relatado
ORAC	– <i>Oxygen radical absorbance capacity</i>
PBS	– Solução salina tamponada com fosfato
PG	– Propil galato
TBHQ	– Tercbutilhidroquinona
TEAC	– Atividade antioxidante equivalente ao trolox
TGA	– Análise termogravimétrica
TPTZ	– 2,4,6-tri(2-piridil) –1,3,5-triazina
TROLOX	– Ácido 6-Hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico
USP	– Unidade de substância pura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 UVAIA (<i>EUGENIA PYRIFORMIS</i> CAMBESS)	22
2.1.1 Aspectos gerais	22
2.1.2 Composição físico-química	23
2.1.2.1 Composição fitoquímica	25
2.1.3 Atividade antioxidante	31
2.1.3.1 Mecanismos de ação dos antioxidantes	31
2.1.3.2 Avaliação <i>in vitro</i> da atividade antioxidante	33
2.1.3.2.1 Ensaio de captura do radical livre ABTS ^{•+}	33
2.1.3.2.2 Ensaio de captura do radical livre DPPH [•]	34
2.1.3.2.3 Ensaio do poder antioxidante redutor do ferro (FRAP)	34
2.1.3.2.4 Método de Folin-Ciocalteu	35
2.1.3.3 Atividade antioxidante da uvaia	36
2.1.4 Outras Atividades biológicas da uvaia	36
2.2 EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE FRUTAS	37
2.3 MICROENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS DE FRUTAS	45
2.3.1 Aspectos gerais dos processos de microencapsulação	45
2.3.2 Materiais de revestimento	46
2.3.3 Técnicas de microencapsulação	49
2.3.3.1 Microencapsulação por secagem por pulverização	49
2.3.3.2 Microencapsulação por liofilização	51
2.3.4 Microencapsulação por secagem por liofilização de compostos bioativos de frutas	53
3 MATERIAL E MÉTODOS	57
3.1 PRODUTOS QUÍMICOS, REAGENTES E SOLUÇÕES	58
3.2 MATÉRIA-PRIMA	59
3.2.1 Preparo da amostra	59

3.2.2 Caracterização físico-química	60
3.2.2.1 Composição química e análises físico-químicas	60
3.2.2.2 Caracterização morfológica	62
3.2.2.3 Determinação da concentração de compostos bioativos e atividade antioxidante	62
3.2.2.3.1 Determinação da concentração de compostos fenólicos totais	62
3.2.2.3.2 Determinação da atividade antioxidante <i>in vitro</i>	63
3.3 EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS	64
3.3.1 Impacto do preparo da amostra e seleção do solvente de extração	64
3.3.2 Seleção do método de extração	65
3.3.3 Influência da temperatura de extração e razão amostra/solvente	67
3.4 ENSAIO DE CITOTOXICIDADE	69
3.4.1 Linhas e culturas celulares	69
3.4.2 Ensaio de citotoxicidade	69
3.5 MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA	72
3.5.1 Produção das micropartículas	72
3.5.2 Perfil de compostos fenólicos do extrato de resíduo de uvaia concentrado	75
3.5.3 Caracterização físico-química, análise instrumental e avaliação das propriedades funcionais das micropartículas	76
3.5.3.1.1 Morfologia de superfície	76
3.5.3.1.2 Umidade e atividade de água	76
3.5.3.1.3 Cor instrumental	76
3.5.3.1.4 Densidade aparente	77
3.5.3.1.5 Estabilidade térmica	77
3.5.3.1.6 Identificação de grupos funcionais e estrutura química	78
3.5.4 Solubilidade	78
3.5.5 Higroscopicidade	79
3.5.6 Eficiência de encapsulação	79
3.5.7 Atividade antimicrobiana	80
3.5.8 Estabilidade de compostos fenólicos durante a digestão gastrointestinal simulada <i>in vitro</i>	82
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84

4.1 QUANTIFICAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS E AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE EM DIFERENTES FRAÇÕES DA UVAIA	84
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E FÍSICO-QUÍMICA DOS RESÍDUOS DE UVAIA.....	86
4.2.1 Composição química e análises físicas e físico-químicas	86
4.2.2 Caracterização morfológica	89
4.2.3 Concentração de compostos bioativos e atividade antioxidante	91
4.3 EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS	94
4.3.1 Impacto do preparo da amostra e seleção do solvente de extração	94
4.3.2 Seleção do método de extração	97
4.3.3 Influência da temperatura de extração	101
4.3.4 Influência da razão amostra/solvente	103
4.3.5 Concentração de compostos fenólicos e atividade antioxidante do extrato de resíduo de uvaia	105
4.4 ENSAIO DE CITOTOXICIDADE	107
4.5 MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA	109
4.5.1 Identificação e quantificação de compostos fenólicos do extrato de resíduo de uvaia	109
4.5.2 Caracterização físico-química, análise instrumental e avaliação das propriedades funcionais das micropartículas	112
4.5.2.1 Morfologia de superfície	112
4.5.2.2 Umidade, atividade de água (a_w), cor instrumental, densidade aparente, solubilidade e higroscopicidade.....	113
4.5.2.3 Estabilidade térmica	120
4.5.2.4 Identificação de grupos funcionais e estrutura química	121
4.5.2.5 Eficiência de encapsulação	124
4.5.2.6 Atividade antimicrobiana.....	125
4.5.2.7 Estabilidade de compostos fenólicos durante a digestão gastrointestinal simulada <i>in vitro</i>	129
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	134
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
REFERÊNCIAS.....	137
ANEXO 1 – ARTIGO PUBLICADO NA <i>INTERNATIONAL JOURNAL OF FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY</i> (HTTPS://DOI.ORG/10.1111/IJFS.17342)	150

ANEXO 2 – ESTUDO CIENCIOMÉTRICO175

1 INTRODUÇÃO

A uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) é uma planta frutífera pertencente à família Myrtaceae, a qual ocorre naturalmente na região da Mata Atlântica e tem distribuição geográfica no Brasil, Argentina e Paraguai (DACOREGGIO et al., 2023). O fruto da uvaia é uma fonte rica de ácido ascórbico, carotenoides e compostos fenólicos, conhecidos por sua expressiva atividade antioxidante (TAVER et al., 2022). Especificamente, os compostos fenólicos têm demonstrado potencial na prevenção de várias doenças, incluindo condições neurodegenerativas, cardiovasculares, diabetes, inflamatórias e infecciosas (RUDRAPAL et al., 2022).

Estudos recentes têm mostrado que os resíduos resultantes do processo de separação da polpa da uvaia também são fontes de compostos bioativos (RAMOS et al., 2017; RODRIGUES et al., 2021). A extração sólido-líquido é uma etapa crítica para recuperar esses compostos de forma eficiente (ABBASI-PARIZAD et al., 2022). Embora métodos convencionais, como a maceração, sejam amplamente utilizados, métodos alternativos como, por exemplo, a extração assistida por ultrassom (EAU) e por homogeneizador de alta velocidade (EAH) têm sido empregados com sucesso (ALARA; ABDURAHMAN; UKAEGBU, 2021; DANIELSKI et al., 2022; PATRA; ABDULLAH; PRADHAN, 2022).

A aplicação de ultrassom aumenta a taxa de transferência de massa através da geração de cavitação acústica no meio contendo a amostra (PATRA; ABDULLAH; PRADHAN, 2022), enquanto o homogeneizador realiza esse aumento por meio da aplicação de forças de cisalhamento e empuxo (DANIELSKI et al., 2022). É essencial realizar estudos comparativos entre diferentes métodos de extração e otimizar as condições do processo para maximizar o rendimento dos compostos desejados. No entanto, compostos fenólicos são sensíveis à oxidação, temperatura e pH, o que pode ser minimizado por meio da microencapsulação dos extratos obtidos (BRITO et al., 2022; JAFARI et al., 2023b).

Dentre os materiais encapsulantes frequentemente utilizados, a maltodextrina e a goma arábica se destacam devido à alta solubilidade, biocompatibilidade e segurança alimentar (JAFARI et al., 2023b). A inclusão de inulina pode oferecer benefícios adicionais, dado que é uma fibra solúvel prebiótica que estimula o crescimento de bactérias intestinais benéficas (CORRÊA-FILHO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2019). A técnica de secagem por liofilização tem sido reconhecida

como eficaz e reproduzível para a encapsulação (BRITO et al., 2022), conferindo proteção a substâncias sensíveis ao calor (PAVLOVIĆ et al., 2023).

Embora haja interesse em quantificar os compostos bioativos da uvaia, há poucos estudos que exploram a recuperação desses compostos como uma forma de valorizar o resíduo (SGANZERLA; DA SILVA, 2022). Rodrigues et al. (2021) empregaram uma combinação de EAU com osmose inversa para concentrar os compostos fenólicos extraídos da casca e sementes de uvaia, resultando em um aumento de 6,2 vezes (332,22 mg equivalentes de ácido gálico (EAG) 100 g⁻¹ base úmida (BU)) em comparação com o extrato aquoso inicial. Farias et al. (2020b) submeteram amostras de fração comestível e sementes de uvaia à EAU com solução etanólica e encontraram maior concentração de compostos fenólicos na semente. De Avelar et al. (2019) utilizaram o resíduo de uvaia como alternativa ao corante caramelo sintético para colorir confeitos, obtendo cores mais intensas em comparação ao corante sintético.

Apesar desses avanços, ainda há lacunas expressivas na literatura em relação à extração de compostos bioativos do resíduo da uvaia. Há escassez de informações sobre o impacto de diferentes métodos de extração, relações sólido/solvente e pré-tratamentos da amostra, como desidratação e ajuste do tamanho das partículas. Além disso, não foram encontradas pesquisas relacionadas à microencapsulação dos compostos bioativos presentes nos extratos derivados do resíduo da uvaia e estudos sobre as possibilidades de aplicação dos extratos são limitados.

Diante desse contexto, o propósito deste estudo foi avaliar diferentes solventes, métodos e condições para a extração de compostos fenólicos do resíduo de uvaia, bem como investigar a microencapsulação do extrato por liofilização, utilizando como agentes encapsulantes, goma arábica, maltodextrina e/ou inulina. O intuito foi desenvolver micropartículas que viabilizem o transporte de compostos bioativos, transformando um recurso subutilizado em uma matéria-prima valiosa para as indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética. Essas micropartículas possuem potencial para prolongar a vida útil de produtos alimentícios e trazer benefícios para a saúde humana. Em um contexto em que a demanda por produtos saudáveis e naturais está em constante crescimento, isso é particularmente relevante. Espera-se que este estudo forneça informações valiosas para a produção de extratos de resíduo de uvaia em pó de alta qualidade e estimule pesquisas futuras sobre a extração de compostos

bioativos de outros resíduos alimentares, impulsionando assim a produção de alimentos saudáveis e sustentáveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um processo integrado de valorização do resíduo proveniente da uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) por meio da extração de compostos fenólicos e subsequente microencapsulação.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o resíduo por meio de análises físicas, químicas e físico-químicas, incluindo parâmetros como umidade, cinzas, proteínas, lipídios, carboidratos, sólidos solúveis, acidez total titulável, pH, cor, morfologia superficial, conteúdo fenólico total e atividade antioxidante;
- Maximizar a extração de compostos fenólicos do resíduo, avaliando diferentes solventes (água, água acidificada, etanol aquoso) e métodos assistidos (ultrassom, agitação magnética, homogeneizador de alta velocidade), assim como as variáveis do processo, como temperatura e razão amostra/solvente;
- Analisar a citotoxicidade e a atividade antitumoral do extrato de resíduo de uvaia em células HEK293 e MCF-7, investigando a dependência de dose e o tempo de exposição;
- Determinar o perfil de compostos fenólicos presentes no extrato de resíduo de uvaia por meio de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE);
- Desenvolver e caracterizar micropartículas do extrato de resíduo de uvaia utilizando diferentes agentes encapsulantes, por meio de análises físico-químicas (morfologia, umidade, atividade de água, densidade, solubilidade e higroscopicidade), térmicas (termogravimetria) e espectroscópicas (FT-IR);
- Determinar a eficiência de encapsulação dos compostos fenólicos nas micropartículas e avaliar a atividade antimicrobiana do extrato de resíduo de uvaia e das micropartículas contra cepas bacterianas Gram-positivas e Gram-

negativas e a digestão gastrointestinal *in vitro* conforme o protocolo INFOGEST.

DIAGRAMA CONCEITUAL DO TRABALHO

Desenvolver um processo integrado de valorização do resíduo proveniente da uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) por meio da extração de compostos fenólicos e subsequente microencapsulação do extrato

MOTIVAÇÃO:	• Expansão das pesquisas sobre bioativos em resíduos da família Myrtaceae. • Interesse crescente das indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética nesses compostos devido aos benefícios à saúde e à demanda por ingredientes naturais e funcionais. • Reconhecimento do potencial bioativo da uvaia, rica em ácido ascórbico, carotenoides e compostos fenólicos. • Carência de informações sobre impacto de pré-tratamentos, solventes, métodos e condições na extração de fenólicos da uvaia. • Escassez de dados sobre citotoxicidade e atividades biológicas do resíduo de uvaia, como antitumoral e antimicrobiana. • Ausência de estudos sobre microencapsulação do extrato de uvaia e propriedades das micropartículas. • Transformar um resíduo subutilizado em recursos valiosos para as indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética.
ESTADO DA ARTE:	• Dos Santos et al. (2023): Extraíram fenólicos do bagaço de uvaia por EAU com etanol 80 %, obtendo alta concentração (181,9 mg EAG g⁻¹), elevada atividade antioxidante (1366,0 µmol Trolox g⁻¹) e eficácia antimicrobiana contra <i>L. monocytogenes</i>, <i>L. innocua</i>, <i>B. cereus</i> e <i>S. aureus</i>. • Farias et al. (2021): Avaliaram a bioacessibilidade de fenólicos em extratos de frações comestíveis e sementes de uvaia após digestão <i>in vitro</i>, mostrando redução de fenólicos (50,08 %) e atividade antioxidante (8,04 % a 27,23 %) nas sementes. • Rodrigues et al. (2021): Utilizaram EAU e osmose inversa para concentrar fenólicos da casca e sementes de uvaia, aumentando a concentração em 6,2 vezes (332,22 mg EAG 100 g⁻¹ BU) em relação ao controle, identificando treze compostos, como ácido gálico e elágico. • Farias et al. (2020b): Extraíram fenólicos de frações comestíveis e sementes de uvaia por EAU com solução de etanol, com sementes apresentando maior concentração. • De Avelar et al. (2019): Testaram resíduos de uvaia como substituto para corante caramelo sintético em confeitos, obtendo coloração mais intensa. • Ramos et al. (2017): Secaram resíduos de uvaia a 40, 60 e 80 °C, observando redução de fenólicos de 3 % a 21 % e menores perdas a 40 °C.
HIPÓTESES	• Pré-tratamentos (secagem e ajuste do tamanho de partículas) impactam a extração de bioativos. • Diferentes solventes e métodos de extração geram variações na recuperação de fenólicos, com melhor desempenho para soluções de etanol. • Métodos assistidos (ultrassom, ultra-homogeneização) aumentam a recuperação de fenólicos. • Temperatura e razão amostra/solvente influenciam a extração de bioativos. • Extrato de uvaia é citotóxico e antitumoral para células cancerígenas, sem afetar células normais. • Microencapsulação com maltodextrina, goma arábica e/ou inulina gera micropartículas com baixa umidade e higroscopicidade, alta solubilidade, resistência térmica e cor atraente, ideais para a indústria. • Tipo de encapsulante afeta as propriedades físico-químicas e funcionais das micropartículas. • Micropartículas têm atividade antioxidante e antimicrobiana, com potencial aplicação em alimentos, cosméticos e farmacêuticos. • Micropartículas resistem à digestão e liberam fenólicos gradualmente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo é composto por três tópicos principais que fornecem suporte teórico para o entendimento do trabalho. No primeiro tópico, é discutida a composição físico-química dos frutos e do resíduo resultante da separação da polpa da uvaia, bem como os mecanismos de ação dos compostos antioxidantes. No segundo tópico, são apresentados os métodos de extração assistidos por ultrassom e homogeneização de alta velocidade. Por fim, o terceiro tópico trata da técnica de microencapsulação por liofilização, utilizada para aumentar a estabilidade dos compostos fenólicos.

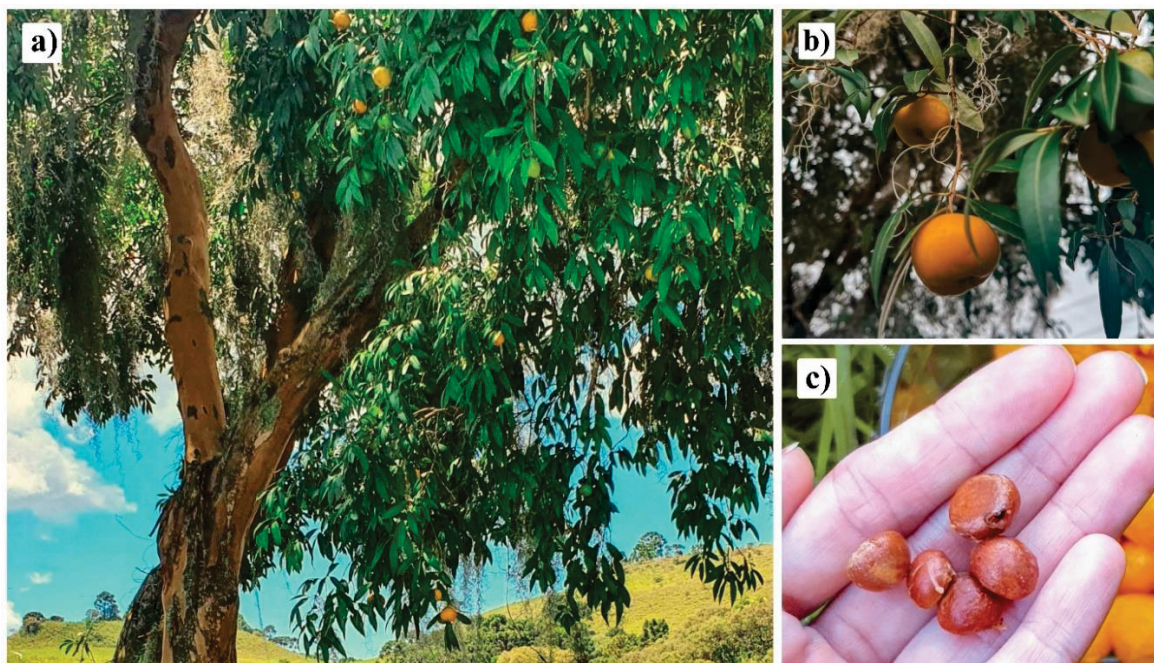
2.1 UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS)

2.1.1 Aspectos gerais

A uvaieira é uma árvore que possui um tronco ereto e uma copa arredondada, e pode atingir de 6 a 13 m de altura (MEDEIROS et al., 2019). Seus frutos são bagas de coloração amarelada, dotadas de sabor ácido e aroma peculiar. Apresentam morfologia piriforme e revestimento viloso, com dimensões médias de aproximadamente 2,0 cm de comprimento (FARIAS et al., 2020a). Cada fruto possui em média uma massa de 8,5 g, sendo que as sementes, variando de 1 a 3 por fruto, correspondem a aproximadamente 16% da massa total (FARIAS et al., 2020b; JACOMINO et al., 2018). Na FIGURA 1a-c está ilustrada a aparência da uvaieira (a), bem como de seus frutos (b) e sementes (c).

Embora os frutos tenham potencial para diversas aplicações, como a produção de polpas congeladas, sucos, geleias e sorvetes (DE ARAÚJO et al., 2019), a existência de pomares comerciais de uvaia é rara. A produção dos frutos é predominantemente oriunda de pomares domésticos (JACOMINO et al., 2018). Essa produção pode variar significativamente de uma planta para outra durante cada safra, podendo algumas delas apresentar uma produção de até 50 kg de frutos. Além disso, a época de colheita varia conforme a região geográfica, destacando-se os estados brasileiros do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo como os maiores produtores (JACOMINO et al., 2018).

FIGURA 1 – VISÃO GERAL DA ESPÉCIE *EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS (a), FRUTOS (b) E SEMENTES (c)



FONTE: A autora (2024).

É relevante destacar que as épocas de colheita, assim como as condições agrônômicas, ambientais e nutricionais das culturas, são fatores determinantes que podem influenciar a composição físico-química dos frutos (SCHMIDT et al., 2019). Além disso, as frações dos frutos que frequentemente são descartadas, tais como cascas, sementes e bagaços, também possuem valor nutricional variável. As composições tanto dos frutos quanto do resíduo resultante da separação da polpa, as quais podem variar em termos quantitativos e qualitativos, são apresentadas a seguir.

2.1.2 Composição físico-química

A TABELA 1 compila os resultados de estudos diversos que investigaram a composição físico-química tanto da polpa quanto do resíduo da uvaia. É pertinente ressaltar que a literatura identifica distintas cultivares de uvaia, tais como Bolívia, Comum, Doce de Patos de Minas, Pêra, Rugosa, Rugosa Doce e Dura, cada uma possuindo suas próprias características químicas, perfis de compostos bioativos e atividades antioxidantes particulares (DA SILVA et al., 2019; JACOMINO et al., 2018). Adicionalmente, evidencia-se que as propriedades nutricionais dos frutos de uvaia variam conforme o estágio de maturação no momento da colheita (DA SILVA et al.,

2019). Por exemplo, exemplares colhidos precocemente tendem a apresentar concentrações elevadas de ácidos orgânicos, ao passo que a colheita tardia favorece a obtenção de frutas com maior concentração de açúcares (FREITAS et al., 2019).

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA POLPA E DO RESÍDUO RESULTANTE DA SEPARAÇÃO DA POLPA DA UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS)

Análise	Polpa		Resíduo	
	Conteúdo	Referência	Conteúdo	Referência
pH	2,96– 3,74	Da Silva et al. (2022)	3,93	Rodrigues et al. (2021)
Sólidos solúveis (° Brix)	3,60– 10,50	Da Silva et al. (2022)	2,70	Rodrigues et al. (2021)
Acidez total titulável (mg AC 100 g ⁻¹)	7,91– 26,12	Sganzerla et al. (2021)	NR	
Umidade (g 100 g ⁻¹)	80,68– 94,50	Da Silva et al. (2022) e Sganzerla et al. (2021)	76,0– 89,20	Ramos et al. (2017) e Rodrigues et al. (2021)
Cinzas (g 100 g ⁻¹)	0,23– 0,52	Da Silva et al. (2022)	0,25– 0,31	Ramos et al. (2017) e Rodrigues et al. (2021)
Proteínas (g 100 g ⁻¹)	0,66– 1,69	Da Silva et al. (2022)	2,64– 2,66	Ramos et al. (2017) e Rodrigues et al. (2021)
Lipídios (g 100 g ⁻¹)	0,21– 0,61	Da Silva et al. (2022)	0,35– 0,36	Ramos et al. (2017) e Rodrigues et al. (2021)
Carboidratos (g 100 g ⁻¹)	4,20– 11,64	Da Silva et al. (2022)	20,99	Rodrigues et al. (2021)
Açúcar total (g sacarose 100 g ⁻¹)	1,63– 4,48	Sganzerla et al. (2021)	NR	
Açúcar redutor (g glicose 100 g ⁻¹)	1,19– 3,87	Sganzerla et al. (2021)	NR	
Açúcar não redutor (g sacarose 100 g ⁻¹)	0,02– 1,36	Sganzerla et al. (2021)	NR	
Fibra alimentar (g 100 g ⁻¹)	3,27– 3,72	Da Silva et al. (2019)	4,72	Ramos et al. (2017)
Pectina solúvel (g AG 100 g ⁻¹)	0,17– 0,18	Farias et al. (2020a)	NR	
Pectina total (g AG 100 g ⁻¹)	0,95	Da Silva et al. (2022)	NR	

Valores expressos em base úmida. AC – Ácido cítrico. AG – Ácido galacturônico. NR – Não relatado.

A avaliação dos valores de pH tanto da polpa quanto do resíduo da uvaia revelou uma acidez significativa, uma característica típica de frutas cítricas devido à presença predominante de ácidos orgânicos, como ácido cítrico e ácido málico. Tal observação foi corroborada pela determinação da acidez total titulável da polpa que quantifica a concentração de ácidos na fruta. No entanto, a acidez do resíduo não foi determinada em nenhum dos estudos disponíveis. Mesmo assim, é plausível inferir que a semente, sendo a fração predominante do resíduo, contenha menos ácidos

orgânicos em comparação à polpa, uma vez que o pH do resíduo é superior ao da polpa. Além disso, os resultados da análise dos sólidos solúveis da polpa indicaram uma significativa presença de açúcares, conferindo-lhe um perfil gustativo adocicado. Por outro lado, o resíduo apresentou uma concentração menor de sólidos solúveis em comparação com a polpa.

A análise da umidade tanto da polpa quanto do resíduo da uvaia evidenciou a alta perecibilidade dessa fruta, atribuída ao elevado conteúdo de água presente em sua composição. Em relação à sua composição nutricional, a uvaia se destaca por sua riqueza em carboidratos, acompanhada por quantidades menores de proteínas e lipídios. Dentre os açúcares, a frutose é preponderante, seguida por sacarose e glicose, encontradas principalmente na porção comestível da fruta, conforme apontado por Farias et al. (2020b). O resíduo da uvaia apresenta uma concentração ainda maior de carboidratos, possivelmente devido ao conteúdo de amido nas sementes.

A uvaia também é uma excelente fonte de fibras, as quais podem contribuir significativamente para a ingestão diária recomendada. Estudos mostram que o consumo de uma porção de 200 g de uvaia pode fornecer de 15,97% a 25,68% e de 24,28% a 39,03% da ingestão diária recomendada de fibra para homens e mulheres adultos, respectivamente (DA SILVA et al., 2019). As cascas, sementes e bagaço da fruta também são ricos em fibras. Além disso, a presença de pectinas na uvaia, juntamente com os sólidos solúveis e pH, tem um papel importante na textura, estrutura e preservação da fruta (DA SILVA et al., 2018b).

Embora a composição físico-química da polpa e do resíduo da uvaia possa variar, os resultados obtidos até o momento indicam um considerável potencial para a utilização das diferentes partes do fruto como matéria-prima na indústria de alimentos. Além dos nutrientes essenciais, as diversas frações da uvaia apresentam compostos bioativos de grande relevância em sua composição química, os quais são discutidos a seguir.

2.1.2.1 Composição fitoquímica

Na TABELA 2 estão apresentados os valores das concentrações de compostos bioativos e das atividades antioxidantes da polpa e do resíduo da uvaia. Os compostos bioativos derivados de plantas são, em sua maioria, gerados por meio

de vias metabólicas secundárias, sendo designados como metabólitos secundários (NGUYEN, 2017). Embora esses compostos não estejam diretamente envolvidos no metabolismo fotossintético ou respiratório das plantas, eles são essenciais para sua sobrevivência (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019). Os metabólitos secundários são produzidos como uma resposta aos mecanismos de defesa das plantas contra predadores, patógenos, microrganismos e fatores de estresse abióticos (NGUYEN, 2017).

TABELA 2 – COMPOSTOS BIOATIVOS E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DA POLPA E DO RESÍDUO RESULTANTE DA SEPARAÇÃO DA POLPA DA UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS)

Análise	Polpa		Resíduo	
	Conteúdo	Referência	Conteúdo	Referência
Vitamina C (mg AA 100 g ⁻¹)	1,37–142	Da Silva et al. (2022), Da Silva et al. (2019) e Taver et al. (2022)	3,36	Rodrigues et al. (2021)
Carotenoides (mg 100 g ⁻¹)	1,3 – 441,26	Da Silva et al. (2022)	7,20 (µg 100 g ⁻¹)	Rodrigues et al. (2021)
Compostos fenólicos (mg EAG 100 g ⁻¹)	89,7– 483,25	Da Silva et al. (2022) e Taver et al. (2022)	54,64– 404	Rodrigues et al. (2021) e Ramos et al (2017)
Flavonoides (mg EQ 100 g ⁻¹)	22,97– 38,58	Da Silva et al. (2019)	360,74	Rodrigues et al. (2021)
ABTS ^{•+} (mmol TEAC g ⁻¹)	0,33– 9,23	Da Silva et al. (2022)	15,73	Rodrigues et al. (2021)
DPPH [•] (mmol TEAC g ⁻¹)	0,01– 0,03	Da Silva et al. (2019)	9,60	Rodrigues et al. (2021)
FRAP (mmol TEAC g ⁻¹)	2,28– 9,34	Sganzerla et al. (2019)	22,20	Rodrigues et al. (2021)

Valores expressos em base úmida. AA – Ácido ascórbico. EAG – Equivalentes de ácido gálico. EQ – Equivalentes de quercetina. TEAC – Atividade antioxidante equivalente ao Trolox. NR – Não relatado.

Os valores apresentados indicam a presença de diferentes compostos bioativos na uvaia, como vitamina C, carotenoides e compostos fenólicos, incluindo os flavonoides. Tais compostos podem ser isolados dos frutos ou seus resíduos e utilizados como suplementos alimentares ou aditivos para melhorar as propriedades físico-químicas, nutritivas e sensoriais dos alimentos (NGUYEN, 2017). Além disso, possuem propriedades farmacológicas potentes e atuam como agentes preventivos para diversas doenças crônicas (NGUYEN, 2017).

A vitamina C, ou ácido ascórbico (AA), é uma molécula hidrofílica essencial para diversas atividades fisiológicas e metabólicas (CARITÁ et al., 2020). Ela desempenha funções antioxidantes e cofatoras em processos como a síntese de colágeno, a regulação epigenética, a produção de imunoglobulinas, a produção de

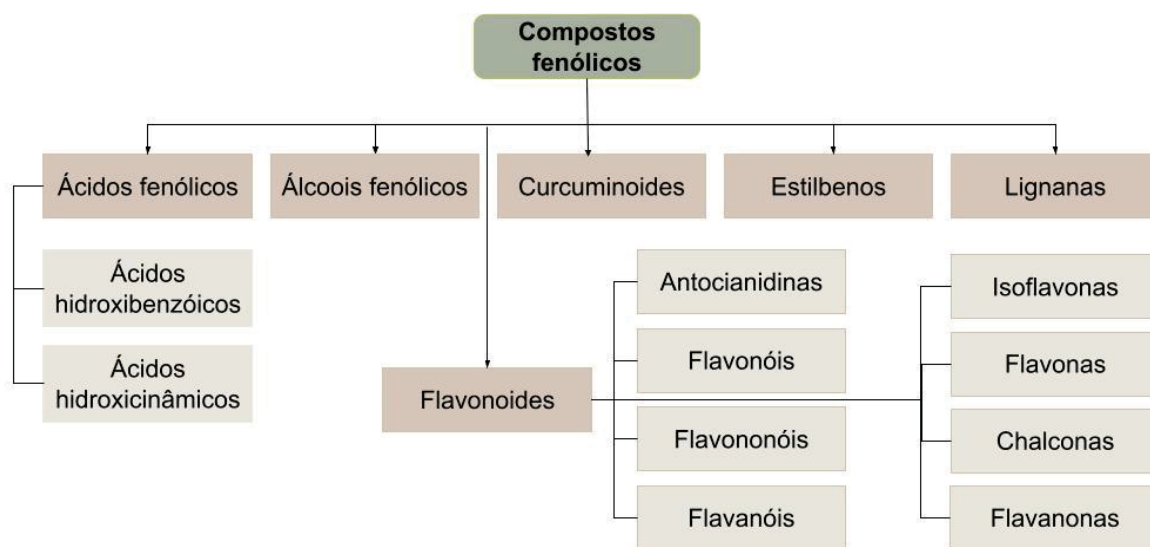
interferon e fatores reguladores de tumores (CARITÁ et al., 2020). A uvaia contém uma quantidade significativa de vitamina C na polpa, fornecendo 72,04% e 86,45% da ingestão diária recomendada para homens e mulheres adultos, respectivamente, através do consumo de apenas um fruto (DA SILVA et al., 2019). Contudo, a sua estabilidade é um desafio, visto que a vitamina C é suscetível à degradação em meio aquoso, altas temperaturas, pH e na presença de oxigênio e íons metálicos (CARITÁ et al., 2020).

Os carotenoides são compostos lipofílicos que possuem uma estrutura de polieno com um número variável de ligações duplas conjugadas (RODRIGUEZ-CONCEPCION et al., 2018). Esses compostos têm sido associados a diversos benefícios à saúde, incluindo a proteção ocular, melhoria da função cognitiva, saúde cardiovascular e redução do risco de alguns tipos de câncer (EGGERSDORFER; WYSS, 2018). Os frutos da uvaia apresentam coloração amarelada devido à alta concentração desses compostos, principalmente β -caroteno, criptoxantina e luteína (DE ARAÚJO et al., 2019; FARIAS et al., 2020b; SCHMIDT et al., 2019). Além desses, outros carotenoides estão presentes na uvaia, como o α -caroteno, zeaxantina, 13-cis- β -caroteno, 9-cis- β -caroteno e 5,6-epóxido (DE ARAÚJO et al., 2019). De acordo com um estudo realizado por Schmidt et al. (2019), a uvaia apresenta um conteúdo significativo de carotenoides em comparação com outras frutas da mesma família, como araçá, cereja, feijoa, guabiroba, jabuticaba e pitanga. No entanto, é importante destacar que a quantidade de carotenoides presente no resíduo da uvaia é consideravelmente menor do que na polpa. Além disso, durante o processamento da fruta, esses compostos podem ser degradados devido a diversos fatores, como reações enzimáticas oxidativas, foto e auto-oxidação, exposição à luz e oxigênio (CASTELUCCI et al., 2020).

Os compostos fenólicos são moléculas que apresentam anéis aromáticos ligados a um ou mais grupos hidroxila e variam em complexidade, desde fenóis simples até polímeros complexos (NGUYEN, 2017). A biossíntese desses compostos geralmente ocorre a partir da fenilalanina ou tirosina, através da via do ácido chiquímico (ZEB, 2020). Os compostos fenólicos podem ser encontrados na forma livre ou conjugada, ligados a um ou mais resíduos de açúcar nos grupos hidroxila ou a ácidos carboxílicos, aminas, ácidos graxos ou outros fenóis (LOSADA-BARREIRO et al., 2022). Tais compostos são conhecidos por suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, as quais contribuem para a prevenção de diversas doenças,

incluindo doenças cardíacas, câncer e diabetes (MARK et al., 2019). Eles são classificados em várias categorias, como ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos, taninos, lignanas, cumarinas, curcuminoides e quinonas (MARK et al., 2019). Na FIGURA 2 estão apresentadas as principais classes de compostos fenólicos encontrados em alimentos. Cada classe possui uma estrutura química distinta e apresenta diferentes propriedades biológicas.

FIGURA 2 – PRINCIPAIS CLASSES DE COMPOSTOS FENÓLICOS ENCONTRADOS EM ALIMENTOS



FONTE: Adaptado de Losada-barreiro et al. (2022).

Os ácidos fenólicos e os flavonoides são as classes de polifenóis mais comumente encontradas nos alimentos (SANTOS-BUELGA et al., 2019). Os ácidos fenólicos são compostos orgânicos que possuem pelo menos um anel aromático, no qual pelo menos um átomo de hidrogênio é substituído por um grupo hidroxila (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019). Eles são caracterizados por moléculas simples e dividem-se em duas subclasses principais: ácidos hidroxibenzóicos e ácidos hidroxicinâmicos (MIR-CERDÀ et al., 2023). Os primeiros derivam de moléculas não fenólicas de ácido benzóico, enquanto os últimos derivam de moléculas não fenólicas de ácido cinâmico (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019). Alguns exemplos são o ácido cafeico (derivado do ácido hidroxicinâmico) e o ácido vanílico (derivado do ácido hidroxibenzóico) (CHRISTODOULOU et al., 2022). A forma usual de ácidos fenólicos é encontrada nas formas amidas, ésteres e glicosídeos, mas raramente na forma livre (SHI et al., 2022).

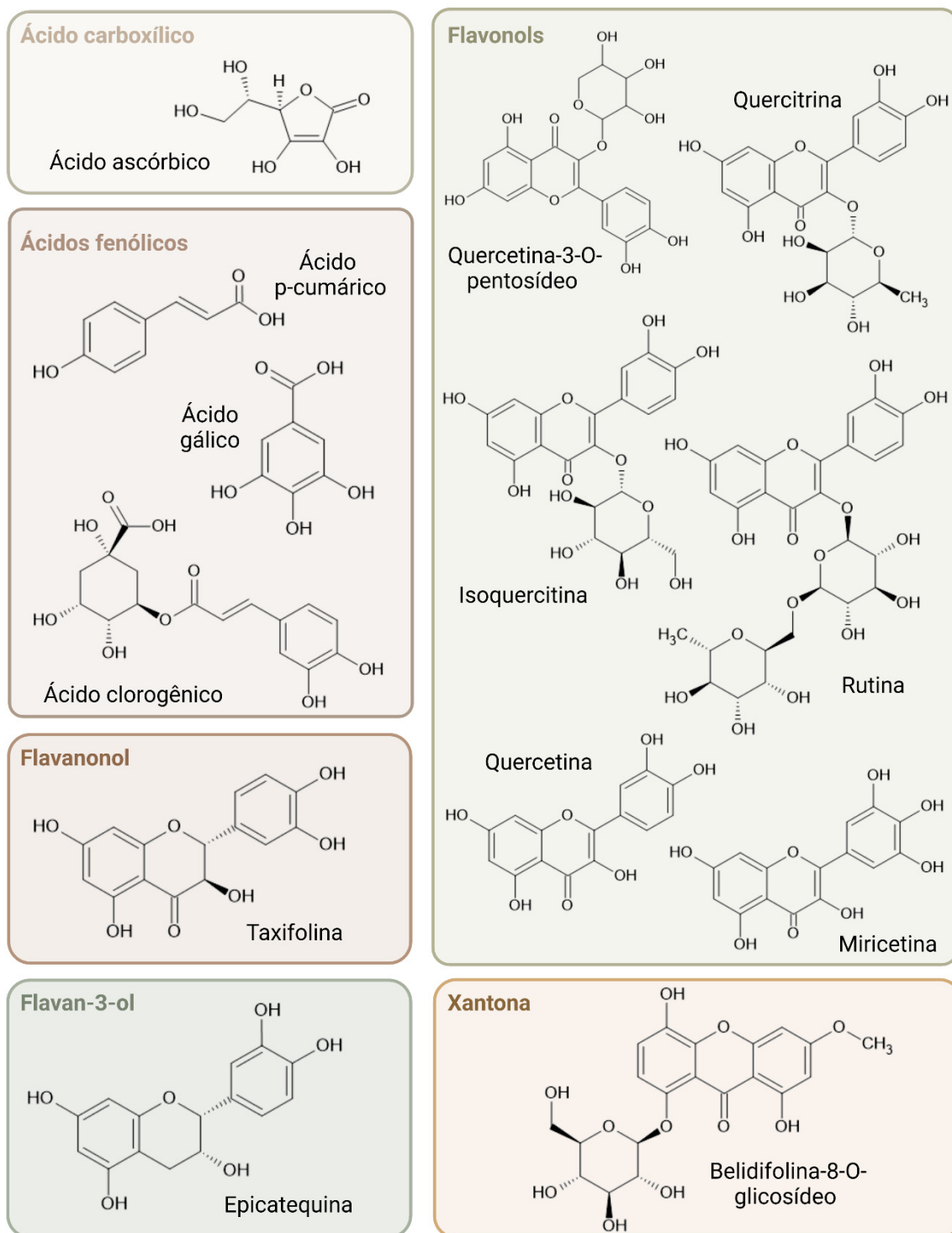
Os flavonoides são o grupo mais abundante e possuem uma estrutura com dois anéis aromáticos ligados por um heterociclo de oxigênio (MIR-CERDÀ et al., 2023). Eles são encontrados principalmente nas folhas e casca das frutas e, frequentemente, se associam a açúcares (FERREIRA; MARTINS; BARROS, 2017). Diferentes subfamílias de flavonoides são definidas de acordo com o grau de oxidação e substituições do heterociclo, tais como as antocianinas, flavonóis, flavanonas, flavanóis, isoflavonas e flavonas (MIR-CERDÀ et al., 2023).

Os frutos de uvaia são ricos em compostos fenólicos, especialmente em ácido gálico e quercetina (DE ARAÚJO et al., 2019). Além desses compostos, outros, como miricetina, kaempferol, rutina, ácido clorogênico e ácido cafeico, podem estar presentes, conforme mencionado por Farias et al. (2020a). Além disso, os resíduos de uvaia também contêm quantidades consideráveis de compostos fenólicos. De acordo com Rodrigues et al. (2021), o resíduo de uvaia contém pelo menos 13 compostos bioativos, incluindo ácido ascórbico, ácido p-cumárico, ácido gálico, ácido clorogênico, epicatequina, taxifolina, rutina, miricetina, quercetina, isoquercitina, quercetina-3-o-pentosídeo, quercitrina e bellidifolin-8-o-glicosídeo. As estruturas químicas desses compostos podem ser visualizadas na FIGURA 3.

Outro estudo interessante realizado por Farias et al. (2020b) avaliou o perfil fitoquímico da fração comestível e das sementes de uvaia, e constatou que a concentração de fenólicos na semente (237,44 mg EAG g⁻¹ base seca (BS)) era aproximadamente cinco vezes maior do que na fração comestível. Além disso, a concentração de flavonoides totais na semente (101,46 mg equivalentes de catequina g⁻¹ BS) era cerca de 16 vezes maior do que na fração comestível. Os autores identificaram nove compostos fenólicos na semente, incluindo ácidos fenólicos, flavonóis, flavan-3-óis monoméricos e flavonas.

Os estudos mencionados revelam que a uvaia é uma fruta rica em compostos antioxidantes e que o resíduo gerado durante a separação da polpa também possui uma concentração significativa desses compostos. Isso indica um grande potencial para a produção de produtos valiosos. A seguir, serão discutidos com maior profundidade esses compostos e suas atividades antioxidantes.

FIGURA 3 – COMPOSTOS BIOATIVOS ENCONTRADOS NO RESÍDUO DA SEPARAÇÃO DA POLPA DA UVAIA



FONTE: A autora (2024). As estruturas químicas foram desenhadas com o software ChemSketch®.

2.1.3 Atividade antioxidante

A compreensão dos antioxidantes é essencial para o entendimento de como essas substâncias podem preservar a qualidade dos alimentos ou promover a saúde humana. Entre os antioxidantes, os compostos fenólicos têm sido amplamente estudados devido à sua capacidade de neutralizar o estresse oxidativo que está associado a distúrbios metabólicos e patologias como obesidade, diabetes e doenças cardiovasculares (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019).

O estresse oxidativo ocorre quando o corpo é sobrecarregado pela produção excessiva de radicais livres que são gerados por diversos processos, incluindo clivagem homolítica, heterolítica ou reações redox (ZEB, 2020). Os radicais livres são espécies químicas que possuem elétrons desemparelhados, sendo os radicais centrados em oxigênio os mais prevalentes em sistemas biológicos. Dentre eles, o radical superóxido ($O_2^{\cdot-}$) e o radical hidroxila ($OH^{\cdot}$) são altamente reativos, juntamente com o peróxido de hidrogênio não radical (H_2O_2), os quais são as espécies reativas de oxigênio mais comuns (RUSKOVSKA; MAKSIMOVA; MILENKOVIC, 2020).

Quando o equilíbrio entre radicais livres e antioxidantes é perturbado, os radicais livres começam a oxidar moléculas celulares essenciais, como proteínas, lipídios, DNA e RNA (MOTA et al., 2023). No entanto, os compostos fenólicos têm a capacidade de inativar os radicais livres e prevenir os danos oxidativos nas células (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019). É importante ressaltar que a oxidação também pode ocorrer nos alimentos quando os radicais livres reagem com as moléculas dos alimentos, danificando-as.

Embora os antioxidantes sintéticos, como hidroxilanisole butilado (BHA), hidroxitolueno butilado (BHT), propil galato (PG) e tercbutilhidroquinona (TBHQ), sejam frequentemente utilizados na indústria alimentícia, em altas concentrações, podem ser tóxicos. Como uma alternativa mais segura, os pesquisadores têm se concentrado em antioxidantes naturais (ZEB, 2020). A seguir, serão elucidados os mecanismos de ação desses antioxidantes naturais.

2.1.3.1 Mecanismos de ação dos antioxidantes

Os antioxidantes são capazes de agir de diferentes formas, incluindo a transferência de um átomo de hidrogênio ou de um elétron para converter o radical

livre em uma espécie estável, a transferência de elétrons acoplada a prótons ou a quelação de metais de transição (ZEB, 2020).

No primeiro mecanismo, o composto antioxidante neutraliza espécies de radicais livres doando átomos de hidrogênio (AMAROWICZ; PEGG, 2019). Por exemplo, quando um radical peroxil ($RO_2^{\cdot}$) reage com um fenol ($ArOH$), o hidrogênio (H) ligado ao anel arílico do fenol é transferido para o radical peroxil, formando um radical ariloxila ($ArO^{\cdot}$). O radical formado é estabilizado por ressonância (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017). A facilidade com que ocorre essa transferência de hidrogênio pode ser quantificada pela energia de dissociação da ligação, sendo que valores menores indicam maior facilidade (CHRISTODOULOU et al., 2022).

No segundo mecanismo, o antioxidante doa um elétron para o radical livre, estabilizando-o em uma forma aniônica (CHRISTODOULOU et al., 2022). O radical aniônico formado é uma espécie energeticamente estável que possui um número par de elétrons (ZEB, 2020). O radical ariloxila formado é posteriormente oxidado, formando a quinona correspondente ($Ar=O$) (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017). Nesse mecanismo, a atividade antioxidante é maior quanto menor for o potencial de ionização, o que significa que a abstração de elétrons é mais fácil (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019).

Os compostos fenólicos também podem exercer sua capacidade antioxidante através da transferência de elétrons acoplada a prótons e da quelação de metais de transição. A transferência de elétrons acoplada a prótons ocorre quando o composto antioxidante doa um próton para um radical livre e se transforma em um ânion, que posteriormente doa um elétron para se estabilizar. Por outro lado, o mecanismo de quelação de metais é a capacidade de certos antioxidantes de quelar metais de transição, impedindo-os de catalisar reações que produzem radicais livres (CHRISTODOULOU et al., 2022).

A estrutura tanto do antioxidante quanto do composto a ser oxidado, a presença de pró-oxidantes e a concentração dessas substâncias afetam a capacidade dos antioxidantes em inibir a propagação de radicais livres (CHRISTODOULOU et al., 2022). Para avaliar a atividade antioxidante, existem diversas técnicas analíticas disponíveis, como espectrométricas, cromatográficas e eletroquímicas. No entanto, os ensaios espectrofotométricos são amplamente utilizados devido à rapidez e baixo custo. Dentre os ensaios espectrofotométricos, $ABTS^{\cdot+}$, FRAP e $DPPH^{\cdot}$ são

amplamente utilizados para avaliar a atividade antioxidante *in vitro* de produtos alimentícios (MOTA et al., 2023).

2.1.3.2 Avaliação *in vitro* da atividade antioxidante

2.1.3.2.1 Ensaio de captura do radical livre ABTS^{•+}

O ensaio ABTS^{•+} é um método amplamente utilizado para avaliar a atividade antioxidante de frutas e extratos vegetais (SHI et al., 2022). O ensaio consiste em gerar o radical ABTS^{•+} por meio da reação entre ABTS (2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)) e persulfato de potássio, resultando em uma cor verde-azulada (CHRISTODOULOU et al., 2022). Os antioxidantes presentes na amostra reduzem o radical ABTS^{•+}, levando a uma diminuição da absorbância em 734 nm (BENKHAIRA; KORAICHI; FIKRI-BENBRAHIM, 2022).

A redução da absorbância é medida por espectrofotometria para avaliar a atividade antioxidante. O Trolox (Ácido 6-Hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico), um análogo sintético da vitamina E, é usado como referência e os resultados são apresentados como capacidade antioxidante equivalente ao Trolox (TEAC), onde valores mais altos indicam maior atividade antioxidante (BENKHAIRA; KORAICHI; FIKRI-BENBRAHIM, 2022). Os mecanismos de transferência de hidrogênio e elétron, bem como a transferência sequencial de elétrons por perda de prótons, podem ter diferentes papéis dependendo das condições de reação, como pH e solvente (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017).

O ensaio é amplamente utilizado devido à sua facilidade e reprodutibilidade (KOTHA et al., 2022), bem como sua versatilidade para amostras hidrossolúveis e lipossolúveis (SHI et al., 2022). Outra vantagem do ensaio é a avaliação de mecanismos antioxidantes em uma ampla faixa de pH (CHRISTODOULOU et al., 2022). No entanto, uma crítica ao método ABTS^{•+} é o tempo de reação entre o ABTS^{•+} e os antioxidantes que pode levar a diferentes medidas dependendo do tempo final (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017). Além disso, o ABTS^{•+} é um radical não fisiológico e não está presente no corpo humano em condições normais (KOTHA et al., 2022).

2.1.3.2.2 Ensaio de captura do radical livre DPPH[•]

Outro método amplamente utilizado para avaliar a capacidade de moléculas em eliminar radicais livres por meio da transferência de hidrogênio ou elétron é o método DPPH[•] (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) (MOTA et al., 2023). O DPPH[•] é um radical orgânico de nitrogênio que contém um elétron de valência desemparelhado (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019). Após aceitar elétrons de antioxidantes, o radical DPPH[•] é neutralizado, resultando em uma mudança de cor (de violeta intensa para amarelo) que pode ser medida espectrofotometricamente a 515 nm (RUFINO et al., 2007b). A atividade antioxidante pode ser expressa como TEAC ou EC₅₀ que avalia a quantidade de antioxidante necessária para reduzir em 50% a concentração inicial do radical (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019).

O ensaio DPPH[•] tem várias vantagens, como baixo custo, facilidade, reprodutibilidade, aplicabilidade em temperatura ambiente e possibilidades de automação e hifenização (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017). No entanto, também tem algumas limitações, como a sensibilidade a algumas bases de Lewis e a necessidade de radicais não fisiológicos (BENKHAIRA; KORAICHI; FIKRI-BENBRAHIM, 2022). Além disso, a precisão pode ser afetada pelos pigmentos e pela cor das amostras (MOTA et al., 2023). É importante notar que o radical DPPH[•] não pode ser dissolvido em água, então metanol, etanol ou misturas aquosas desses compostos são comumente utilizados para dissolvê-lo, sendo que a quantidade de água não deve ultrapassar 60% para tornar o radical mais solúvel (SHI et al., 2022).

2.1.3.2.3 Ensaio do poder antioxidante redutor do ferro (FRAP)

O ensaio do poder antioxidante redutor do ferro é um método comumente utilizado na determinação da atividade antioxidante de alimentos e fluidos biológicos (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017). Ele se baseia na transferência de elétrons, na qual o complexo tripiridiltriazina férrico (Fe³⁺-TPTZ) (de cor amarela) é reduzido para o complexo tripiridiltriazina ferroso (Fe²⁺-TPTZ) (de cor azul) em pH baixo (AMAROWICZ; PEGG, 2019). A mudança na absorbância medida a 593 nm é diretamente proporcional à atividade antioxidante dos antioxidantes presentes na amostra (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019). É importante controlar o pH durante o

ensaio para manter a solubilidade do ferro e evitar a protonação dos compostos antioxidantes (VUOLO; LIMA; MARÓSTICA, 2019).

O método tem algumas vantagens: os reagentes são estáveis e não tóxicos, o teste é altamente sensível e preciso, os fatores estequiométricos dos antioxidantes são constantes em uma ampla gama de concentrações e o teste é robusto, resistindo a pequenas variações nas condições de reação (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017). Além disso, a análise é rápida e direta (MOTA et al., 2023). No entanto, é importante destacar que ele detecta apenas antioxidantes hidrofílicos (CHRISTODOULOU et al., 2022).

2.1.3.2.4 Método de Folin-Ciocalteu

O método de Folin-Ciocalteu (FC) é um ensaio antioxidante comumente utilizado para estimar o conteúdo fenólico total (CFT) em alimentos. Este ensaio é baseado na oxidação de compostos fenólicos em solução alcalina, utilizando-se um reagente heteropoliânion molibdotungstosfato (APAK; CAPANOGLU; SHAHIDI, 2017). Sob essas condições alcalinas, a dissociação do próton fenólico resulta na formação de um íon fenolato, o qual reduz o reagente FC. Os derivados aniônicos dos ácidos fosfotungstico e fosfomolibdico mudam de cor de amarelo para azul, e a absorbância é medida em 760-765 nm (CHRISTODOULOU et al., 2022). Os valores de CFT são geralmente dados como equivalentes de ácido gálico (EAG).

Embora seja um método simples e de baixo custo, os resultados podem ser superestimados, pois o reagente de Folin também reage com outros compostos contendo grupos redutores, como açúcares (BESSA et al., 2021). Portanto, quando comparados com dados obtidos por técnicas de CLAE, os resultados da medição de CFT podem ser exagerados (CHRISTODOULOU et al., 2022).

A atividade antioxidante de compostos alimentares pode ser avaliada por meio de diferentes ensaios, que empregam mecanismos, pH, temperatura e matrizes distintas. Por essa razão, não há um único ensaio universalmente aceito que possa determinar com precisão a atividade antioxidante (KOTHA et al., 2022). Além disso, a afinidade de compostos por água ou lipídios pode influenciar na escolha dos métodos de avaliação, uma vez que alguns métodos funcionam melhor com compostos hidrofílicos e outros com compostos hidrofóbicos. Para uma visão mais abrangente do

potencial antioxidante de um composto alimentar, recomenda-se a avaliação por meio de três ou mais métodos (MOTA et al., 2023).

2.1.3.3 Atividade antioxidante da uvaia

A atividade antioxidante da uvaia tem despertado interesse entre pesquisadores e tem sido objeto de estudos. Essas investigações têm revelado que a uvaia apresenta uma alta atividade antioxidante devido, sobretudo, à presença de compostos fenólicos em sua composição (CASTELUCCI et al., 2020; EGEA; PEREIRA-NETTO, 2019; FARIAS et al., 2020b; LOPES et al., 2018). Em um estudo com ratos, foi observado que o consumo de suco de uvaia pode levar a uma redução significativa no estresse oxidativo (LOPES et al., 2018).

Além disso, o resíduo da uvaia também tem se mostrado uma excelente fonte de antioxidantes, com atividades avaliadas pelos métodos ABTS^{•+} (15,73 mmol TEAC g⁻¹ BU), DPPH[•] (9,60 mmol TEAC g⁻¹ BU) e FRAP (22,20 mmol TEAC g⁻¹ BU), conforme relatado em um estudo recente (RODRIGUES et al., 2021). Outro estudo revelou que a capacidade antioxidante da semente de uvaia foi cerca de 5 vezes maior para os métodos DPPH[•] (235,02 µM TEAC g⁻¹ BS) e ABTS^{•+} (427,86 µM TEAC g⁻¹ BS), e 2 vezes maior para o método da capacidade de absorção de radicais livres de oxigênio (ORAC) (98,58 µM TEAC g⁻¹ BS) em comparação com a fração comestível (FARIAS et al., 2020a).

2.1.4 Outras Atividades biológicas da uvaia

Os compostos bioativos de origem vegetal são reconhecidos por apresentarem diversas propriedades além da atividade antioxidante, tais como ação anti-inflamatória, antidiabética, antigenotóxica, antimutagênica, anti-hiperglicêmica, gastroprotetora e/ou antinociceptiva (DE ARAÚJO et al., 2019). Apesar da presença desses fitoquímicos valiosos na uvaia, a literatura sobre seus efeitos biológicos é limitada.

Entre esses efeitos, destaca-se a atividade antimicrobiana das sementes de uvaia que foi relatada contra múltiplas cepas, incluindo *E. faecalis*, *C. albicans*, *C. krusei*, *C. parapsilosis*, *S. aureus*, *B. cereus*, *P. aeruginosa*, *L. innocua* e *E. coli* (DE ARAÚJO et al., 2019). Além disso, Santos et al. (2023) investigaram o potencial

antimicrobiano de filmes à base de amido incorporados com extratos derivados de resíduos de uvaia, demonstrando eficácia contra *L. monocytogenes*, *L. innocua*, *B. cereus* e *S. aureus*.

Ramirez et al. (2012) investigaram o impacto do extrato etanólico de polpa de uvaia na resposta inflamatória em ratos. A administração oral deste extrato durante 21 dias prévios à indução da inflamação resultou em uma redução significativa na migração de leucócitos, culminando em uma diminuição dose-dependente do edema de pata (com inibições de 51% e 43% observadas em doses de 1 e 0,5 g kg⁻¹, respectivamente). Além disso, o extrato demonstrou uma capacidade de inibir o edema uma hora após a administração, mantendo-se eficaz ao longo do período inflamatório.

São necessários mais estudos para elucidar as atividades biológicas dos compostos presentes na uvaia. No entanto, os achados relacionados à composição fitoquímica e atividades biológicas indicam um potencial elevado para o aproveitamento do resíduo gerado durante o processamento da polpa da uvaia. A extração de compostos bioativos desse material pode representar uma alternativa altamente promissora para a formulação de alimentos funcionais, nutracêuticos e produtos farmacêuticos.

2.2 EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS A PARTIR DE RESÍDUOS DE FRUTAS

A extração de compostos bioativos de resíduos de frutas nativas brasileiras, como a uvaia, pode ser extremamente atraente para a indústria de alimentos. Embora atualmente não haja aplicação comercial do resíduo da uvaia na indústria, é possível explorar o potencial dos compostos bioativos presentes no resíduo como ingredientes em uma ampla variedade de produtos. Esses compostos podem ser utilizados de diversas formas, como na forma livre ou encapsulada, além de poderem ser incorporados em filmes e revestimentos.

O interesse pelo conteúdo de antioxidantes naturais em alimentos à base de plantas pode ser visto sob dois pontos de vista. O primeiro é o da saúde humana, considerando a contribuição desses compostos na prevenção de doenças, quando consumidos na forma de nutracêuticos, ou incorporados nas formulações alimentícias.

O segundo é o do armazenamento, já que os constituintes antioxidantes endógenos ajudam a prolongar a vida útil dos alimentos (AMAROWICZ; PEGG, 2019).

Antioxidantes sintéticos, como o BHA, BHT, TBHQ e PG, têm sido empregados para inibir reações de oxidação em alimentos. No entanto, há uma clara preocupação com os efeitos dessas substâncias na saúde humana, visto que as toxicidades *in vivo* e *in vitro* dos antioxidantes sintéticos foram demonstradas (GOUVÊA et al., 2023). Assim, a exploração do uso de conservantes naturais como alternativa desponta como uma abordagem de destaque, devido à sua segurança, origem natural e ampla disponibilidade.

Ao utilizar compostos bioativos presentes em frutas em alimentos, é possível obter diversos benefícios, tais como a inibição do crescimento microbiano, a redução da oxidação lipídica e a preservação dos atributos sensoriais dos alimentos (MUNEKATA et al., 2023). Na FIGURA 4 é possível visualizar uma variedade de alimentos que podem se beneficiar da aplicação de compostos bioativos encontrados em frutas como conservantes naturais.

FIGURA 4 – EXEMPLOS DE ALIMENTOS QUE SE BENEFICIAM DA APLICAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS COMO CONSERVANTES



FONTE: Adaptado de Munekata et al. (2023). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: AB25977IAW.

A valorização dos resíduos agrícolas por meio da extração de compostos bioativos não apenas aumenta seu valor e possibilita a criação de novos produtos alimentícios, mas também é importante para prevenir riscos ambientais decorrentes

do descarte inadequado de resíduos orgânicos (CASTAÑEDA-VALBUENA et al., 2021; MONTENEGRO-LANDÍVAR et al., 2021). Essa abordagem está alinhada com os princípios do desenvolvimento sustentável, já que visa reduzir o desperdício e promover a utilização eficiente dos recursos naturais, além de incentivar a preservação da Mata Atlântica e seus recursos.

Além dos benefícios ambientais, a valorização dos resíduos agrícolas pode gerar oportunidades de negócios para empresas agroindustriais e a comunidade. Ao utilizar esses resíduos como matéria-prima, é possível ampliar a oferta de produtos no mercado e criar fontes de renda, contribuindo para o progresso econômico e social dessas áreas.

A extração sólido-líquido é a técnica mais empregada para extrair compostos bioativos de matrizes vegetais. Os processos de extração por solvente envolvem a penetração do solvente na matriz sólida, dissolução dos compostos de interesse no solvente, difusão dos compostos para fora da matriz sólida e coleta dos compostos extraídos (PATRA; ABDULLAH; PRADHAN, 2022). Os métodos convencionais de extração de compostos bioativos, como a maceração, envolvem a mistura da matriz com o solvente para permitir a interação e liberação dos compostos (SANTOS-BUELGA et al., 2019). Para melhorar a eficiência e velocidade do processo, uma incubadora de agitação pode ser usada para agitar a mistura, controlar a temperatura e aumentar a superfície de contato entre as amostras e o solvente (SHI et al., 2022). No entanto, essas técnicas apresentam diversas desvantagens que incluem longos tempos de processo, preocupações ambientais em relação aos resíduos de solventes orgânicos e necessidade de purificação adicional para remover o solvente do produto (ABBASI-PARIZAD et al., 2022).

Felizmente, novos métodos de extração potencialmente verdes têm surgido, como a extração com fluido supercrítico, extração assistida por ultrassom, extração assistida por micro-ondas e outros, especialmente quando utilizados com solventes verdes. Esses métodos têm a capacidade de reduzir o tempo de extração, diminuir o consumo de energia e aumentar a eficiência da extração do solvente, mantendo a qualidade do produto (CHANG et al., 2022). Entretanto, o êxito do processo está condicionado à escolha apropriada dos solventes, que deve considerar a polaridade dos compostos desejados (GIL-MARTÍN et al., 2022).

Devido aos grupos hidroxila presentes na estrutura do polifenol, esses compostos são mais solúveis em solventes polares, como metanol, acetonitrila e

acetona (CHANG et al., 2022). Ainda assim, a extração verde tem sido mais valorizada em virtude das questões relacionadas à toxicologia e ao meio ambiente, especialmente em aplicações em alimentos e nutracêuticos (MIR-CERDÀ et al., 2023). As soluções hidroetanólicas e a água são opções comuns na extração de compostos fenólicos para uso em alimentos (MUNEKATA et al., 2023). Além disso, para melhorar a eficácia dos métodos de extração, é comum adicionar uma pequena porcentagem de ácido orgânico ou mineral, como ácido fórmico, acético ou clorídrico, ao solvente de extração. Esses ácidos podem ajudar a melhorar a solubilidade dos analitos e a estabilidade dos extratos, resultando em uma maior recuperação (MIR-CERDÀ et al., 2023).

Além da composição do solvente, outras variáveis do processo, como pH, proporção de amostra para solvente, tempo e temperatura, podem influenciar significativamente a recuperação de compostos fenólicos (GIL-MARTÍN et al., 2022). Cada uma dessas variáveis pode afetar o rendimento da extração de diferentes maneiras, e, portanto, é importante avaliar a influência de cada variável independentemente (SANTOS-BUELGA et al., 2019). Além disso, antes da extração, é preciso pré-tratar o material de interesse para obter amostras homogêneas e de tamanho reduzido, aumentando a área de contato entre a matéria-prima e o solvente. A amostra é comumente submetida a secagem ou liofilização, moída e peneirada (MIR-CERDÀ et al., 2023).

Na TABELA 3 estão apresentados alguns estudos disponíveis na literatura sobre extração de compostos fenólicos a partir de resíduos de frutas da família Myrtaceae, incluindo a uvaia. As amostras estudadas incluíram a casca e semente de uvaia, semente de camu-camu, semente e casca de jabuticaba, casca de feijoa e casca do araçá-vermelho. Dentre os métodos de extração utilizados, destacam-se a extração assistida por ultrassom de sonda, a extração assistida por ultrassom de banho, a maceração e a extração por agitação magnética. A proporção sólido-solvente variou de 0,5/10 a 1/60 (g mL^{-1}), enquanto o tempo de extração variou de 2,5 a 180 min. A temperatura máxima de extração foi de 45 °C, visando preservar a integridade dos compostos termossensíveis. Verificou-se uma variação significativa nas concentrações de compostos fenólicos dependendo da amostra e do método de extração empregado.

TABELA 3 – ESTUDOS SOBRE EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DE RESÍDUOS DE FRUTAS DA FAMÍLIA MYRTACEAE REPORTADOS NA LITERATURA

Amostra	Diâmetro da partícula (mm)	Solvente	Proporção sólido (g mL ⁻¹)	Método de extração	T (°C)	T (min)	Compostos fenólicos (mg EAG g ⁻¹)	Referência
Casca e semente de uvaia	NR	Água	0,250	Assistida por ultrassom de sonda (20 KHz, 750 W (40%))	40	2,5	0,55 ^a	Rodrigues et al. (2021)
Semente de uvaia liofilizada	NR	Etanol:água (80:20 v/v)	0,100	Assistida por ultrassom de banho por dois ciclos (25 KHz, 120 W)	25	10	237,44 ^b	Farias et al. (2020b)
Casca, semente e polpa de uvaia liofilizados	NR	Etanol:água (80:20 v/v)	0,200	Assistida por ultrassom de banho (40 KHz)	30	60	181,90 ^b	Santos et al. (2023)
Casca de camu-camu liofilizada	NR	Etanol:água (50:50 v/v)	0,015	Assistida por ultrassom (50/60 Hz)	28	15	68,95 ^b	Cunha-Santos et al. (2022)
Semente de camu-camu liofilizada	NR	Etanol:metanol:água (33,3:33,3:33,3 v/v/v)	0,015	Assistida por ultrassom (50/60 Hz)	28	15	137,41 ^b	Cunha-Santos et al. (2022)
Semente de jabuticaba seca	0,35	Etanol:metanol:água (33,3:33,3:33,3 v/v/v)	0,050	Sob agitação magnética	45	45	65,51 ^b	Fidelis et al. (2020b)
Semente de camu-camu seca	0,35	Propanona:água:etanol (0,666:0,167:0,167 v/v)	0,050	Sob agitação magnética	45	45	56,19 ^b	Fidelis et al. (2020a)
Casca de jabuticaba liofilizada	1,41	Etanol:água pH 3 acidificado com ácido acético (50:50 v/v)	0,020	Assistida por banho ultrassônico (40 KHz e 150 W)	30	60	39,00 ^b	Barros et al. (2019)
Semente de jabuticaba seca	0,84	Água:propanona (60:40 v/v)	0,050	Sob agitação por dois ciclos	25	30	86,50 ^b	Hacke et al. (2016)
Casca de feijoa seca	0,42 – 0,84	Acetona:água (80:20 v/v)	0,017	Sob agitação (90 rpm)	40	180	32,47 ^b	Tuncel e Yilmaz (2015)
Casca do araçá-vermelho	NR	Etanol:água pH 1,5 acidificado com ácido clorídrico (90:10 v/v)	0,100	Assistida por ultrassom (40 KHz e 154 W)	40	90	5,89 ^b	Meregalli et al. (2020)

^a Valores expressos em base úmida. ^b Valores expressos em base seca. NR – Não relatado. EAG – Equivalentes de ácido gálico.

Destaca-se que os estudos de Rodrigues et al. (2021) e Santos et al. (2023) são os únicos até o momento a abordar a recuperação de compostos fenólicos a partir do resíduo da separação da polpa da uvaia. No estudo de Rodrigues et al. (2021), a extração assistida por ultrassom utilizando água como solvente do resíduo composto por casca e sementes na proporção sólido-solvente de 1:4 (g mL⁻¹) mostrou-se eficiente. O extrato obtido nas condições ideais de 40 °C, 2,5 min e 40% de amplitude ultrassônica apresentou um conteúdo fenólico total de 54,645 mg EAG 100 g⁻¹ BU, além de um conteúdo total de flavonoides de 360,741 mg EQ 100 g⁻¹ BU. É relevante ressaltar que a técnica de extração assistida por ultrassom mostrou-se superior à extração não assistida, a qual resultou em um conteúdo fenólico total de 52,951 mg EAG 100 g⁻¹ BU e um conteúdo total de flavonoides de 167,267 mg EQ 100 g⁻¹ BU.

Em outro estudo conduzido por Santos et al. (2023), foi investigada a extração de compostos fenólicos da casca, semente e polpa de uvaia liofilizados. Utilizando uma mistura de solventes composta por etanol e água (80:20 v/v) e uma proporção sólido-solvente de 0,2 g mL⁻¹, a extração foi realizada por meio da extração assistida por ultrassom de banho. O processo de extração foi conduzido a uma temperatura de 30 °C por 60 min. Os resultados revelaram uma concentração significativa de compostos fenólicos na amostra, com uma concentração de 18190 mg EAG 100 g⁻¹ BS.

Embora os resultados obtidos pelos autores sejam promissores, pode haver outras variáveis que não foram consideradas pelos autores que poderiam maximizar a extração de compostos fenólicos. Por exemplo, a proporção de sólido para solvente e a preparação da amostra, incluindo secagem e peneiramento, podem ter um impacto significativo na extração de compostos bioativos. Além disso, é necessário realizar estudos comparativos para avaliar diferentes métodos de extração e determinar qual é o mais eficiente para extrair compostos bioativos valiosos do resíduo de uvaia. Essa abordagem pode ajudar a maximizar a extração de compostos bioativos e aumentar o potencial de converter o resíduo de uvaia em um extrato de valor agregado.

A EAU tem se destacado como uma técnica eficiente na redução do tempo, da quantidade de solvente e da temperatura necessários para extrair compostos desejados, quando comparada a técnicas convencionais (RODRIGUES et al., 2021). Existem dois dispositivos ultrassônicos comumente utilizados para a extração de compostos bioativos: os banhos ultrassônicos e as sondas ultrassônicas. Nos banhos ultrassônicos, transdutores localizados na base convertem energia em ultrassom, que

é aplicado à amostra. Essa amostra é colocada em banho-maria, com uma potência e tempo específicos. No equipamento que utiliza a sonda, esta é introduzida diretamente na amostra e, em seguida, aplica-se o ultrassom (SALAZAR et al., 2023).

Esse método é baseado em fenômenos térmicos e mecânicos, como a cavitação, que podem romper a parede celular das amostras, diminuir o tamanho das partículas e aumentar a taxa de extração de compostos bioativos (ABBASI-PARIZAD et al., 2022; NAIK et al., 2021). Quando se difundem ondas de ultrassom no solvente de extração que contém a amostra, as bolhas de cavitação começam a se formar devido às sucessivas compressões e expansões no solvente. Essas bolhas crescem gradualmente em tamanho e, quando alcançam uma grande pressão, implodem, quebrando a matriz das paredes celulares e gerando porosidades. Isso permite que o solvente de extração tenha acesso às partículas e, posteriormente, ocorra a liberação de moléculas bioativas de dentro para fora da matriz. O efeito mecânico dos ultrassons induz uma grande penetração do solvente na matriz celular, intensificando a transferência de massa (BENCHIKH et al., 2023). Durante esse processo, as microcorrentes e turbulências presentes agitam e dispersam as partículas sólidas, o que pode levar à quebra das partículas em pedaços menores (NAIK et al., 2021; PATRA; ABDULLAH; PRADHAN, 2022).

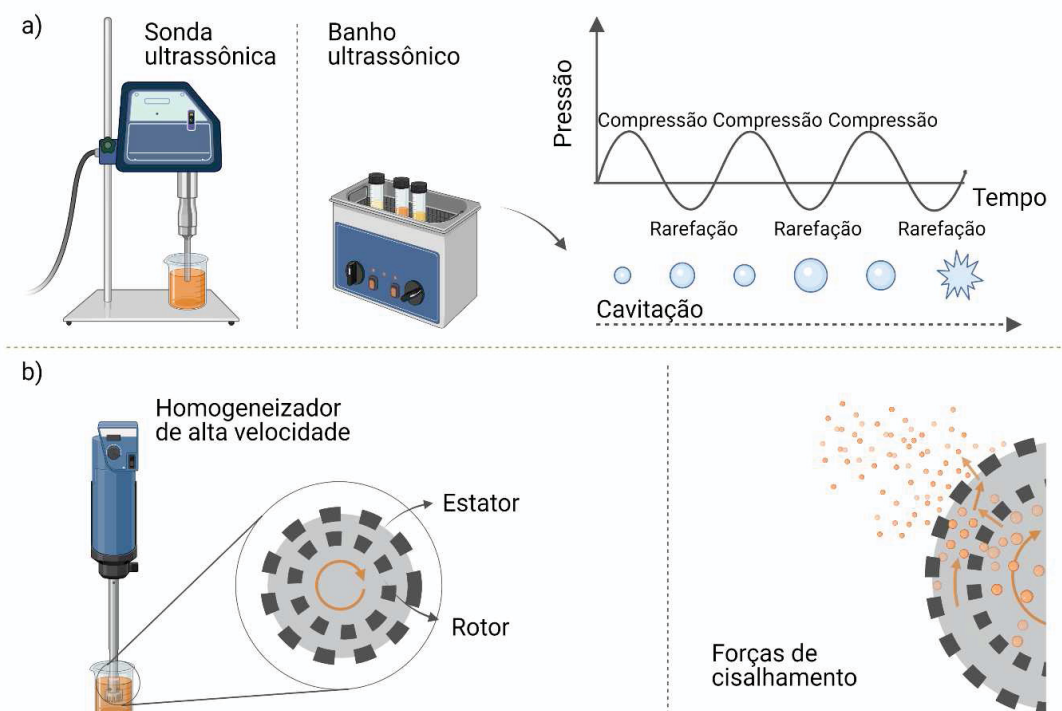
Desse modo, a EAU aumenta a eficiência da extração de compostos fenólicos, acelerando a extração e reduzindo o tempo necessário. Além disso, é possível extrair a mesma quantidade de compostos de interesse usando menos solvente do que na extração sem ultrassom, bem como utilizar temperaturas mais baixas, reduzindo o risco de degradação térmica dos compostos. No entanto, a redução da temperatura pode afetar o rendimento de extração, uma vez que pode ser mais difícil extrair compostos a temperaturas mais baixas. Portanto, é importante encontrar um equilíbrio entre a temperatura e o rendimento de extração (ALARA; ABDURAHMAN; UKAEGBU, 2021).

Além da temperatura, vários fatores podem afetar o rendimento da EAU, incluindo a frequência e intensidade, o tempo de extração e o tamanho das partículas da amostra. Também é essencial considerar o tipo e a proporção do solvente utilizado em relação à amostra (ABBASI-PARIZAD et al., 2022).

Existem ainda alternativas mais simples para a extração de compostos fenólicos. Um exemplo é o homogeneizador de alta velocidade, um dispositivo de homogeneização que promove cisalhamento de alta velocidade e fornece altas forças

de empuxo na matriz da amostra. Essas forças facilitam a transferência de massa, auxiliando o fluxo dos compostos desejados no solvente de extração (DANIELSKI et al., 2022). Esta técnica é conhecida por sua simplicidade e fácil execução. No entanto, para maximizar a recuperação desses compostos, é necessário otimizar as condições de extração. Para isso, é importante selecionar cuidadosamente o tipo e concentração do solvente, a relação entre solvente e sólido, o número de etapas de extração, o pH, a rotação do equipamento, o tempo de extração e a temperatura ideais (CHETRARIU; DABIJA, 2021). Na FIGURA 5 está apresentado um esquema da EAU e da EAH para uma compreensão mais clara das técnicas de extração discutidas.

FIGURA 5 – ESQUEMA DAS EXTRAÇÕES ASSISTIDAS POR ULTRASSOM (a) E POR HOMOGENEIZADOR DE ALTA VELOCIDADE (b)



FONTE: A autora (2024). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: OW2598IY9O.

Entretanto, os compostos fenólicos presentes nos extratos de frutas frequentemente exibem instabilidade diante de diversos tipos de estresses. Estes estresses incluem, mas não se limitam a altas temperaturas, variações de pH, exposição à luz e a presença ou ausência de oxigênio, entre outros fatores. Alguns desses estresses são inerentes ao ambiente, enquanto outros são gerados durante o processamento. Isso, por sua vez, impõe limitações à aplicação desses valiosos compostos (LAUREANTI et al., 2023).

Uma estratégia eficaz para enfrentar esse desafio é a microencapsulação. Essa abordagem consiste em criar uma camada protetora ao redor dos compostos sensíveis, minimizando, assim, sua vulnerabilidade a influências externas (SILVA et al., 2024). A produção de micropartículas contendo compostos de alto valor, a partir de subprodutos agroindustriais, revela-se tanto sustentável para o ecossistema natural como economicamente vantajosa do ponto de vista da economia circular (MARTINS et al., 2022).

2.3 MICROENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS DE FRUTAS

2.3.1 Aspectos gerais dos processos de microencapsulação

O processo de encapsulação consiste na inclusão de um material desejado, denominado "núcleo", em um material de revestimento (HOSSEINI; JAFARI, 2020). Esse processo resulta na formação de encapsulados com variações de tamanho, e tais encapsulados têm uma ampla gama de aplicações na indústria de alimentos (DÍAZ-MONTES, 2023). Os objetivos da utilização dos encapsulados são diversos e incluem a proteção de bioativos contra a degradação, a diminuição da taxa de transferência do material do núcleo para o ambiente externo e a possibilidade de liberação controlada, além de funções como o mascaramento de sabores ou odores indesejados e a separação de componentes em misturas (MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023).

Nesse contexto, encapsulados contendo compostos bioativos têm sido amplamente empregadas na indústria de alimentos para enriquecimento, fortificação, coloração e aumento da estabilidade contra oxidação e proliferação microbológica (JAFARI et al., 2023a). Além do setor alimentício, o processo de encapsulação desempenha um papel relevante em diversas outras indústrias. Por exemplo, na indústria farmacêutica, a encapsulação facilita a administração e absorção rápida de medicamentos por via oral. Na indústria de cosméticos, a encapsulação é amplamente utilizada no desenvolvimento de produtos de cuidados pessoais, como cremes antienvhecimento, protetores solares, hidratantes e fragrâncias, que contêm substâncias ativas, tais como antioxidantes, protetores solares e agentes clareadores (DÍAZ-MONTES, 2023).

No contexto específico da microencapsulação, o tamanho das micropartículas pode variar de alguns décimos de micron a alguns milhares de micrômetros (0,2–5000 μm) (ALU'DATT et al., 2022). Esse processo é valioso para aprimorar a distribuição de bioativos nos alimentos e facilitar a entrega desses compostos ao trato gastrointestinal (JAFARI et al., 2023a).

Para obter micropartículas com propriedades físicas e químicas adequadas a cada aplicação, é imperativo selecionar criteriosamente os materiais de revestimento, levando em consideração diversos parâmetros. Esses parâmetros incluem a compatibilidade e reatividade do material com o núcleo e o ambiente externo, a garantia da segurança alimentar do material utilizado, a avaliação do custo-efetividade, a capacidade de encapsulação e a conformidade com as especificações do produto (ANANDHARAMAKRISHNAN; PADMA ISHWARYA, 2015).

2.3.2 Materiais de revestimento

A seleção criteriosa de materiais de parede é um fator crítico na eficiência da microencapsulação e na estabilidade das micropartículas. Essa escolha está intrinsecamente relacionada às propriedades físico-químicas dos materiais de parede, tais como solubilidade, viscosidade, capacidades emulsificantes, estabilidade térmica e propriedades mecânicas (HALAHLAH et al., 2023). Além disso, é de suma importância que o revestimento seja economicamente eficaz, tanto em termos de rendimento quanto de eficiência no processo de encapsulação (DÍAZ-MONTES, 2023). Cada classe de compostos bioativos apresenta características estruturais únicas, que podem ser classificadas como hidrofílicas, lipofílicas ou, em alguns casos, anfifílicas. As propriedades moleculares e físico-químicas desses compostos, que abrangem fatores como peso molecular, conformações, propriedades elétricas, polaridades e estabilidades, desempenham um papel fundamental na orientação da escolha de um sistema transportador coloidal adequado para uma aplicação específica (ALU'DATT et al., 2022).

Historicamente, dois materiais de parede convencionais se destacam na microencapsulação na área de alimentos: a maltodextrina e a goma arábica (HALAHLAH et al., 2023). Ambos apresentam características vantajosas, como alta solubilidade em água, segurança para a saúde humana, disponibilidade em larga escala e custo acessível (HALAHLAH et al., 2023).

A maltodextrina, um hidrolisado de amido, é obtida por meio da hidrólise parcial do amido usando métodos ácidos ou enzimáticos (HALAHLAH et al., 2023). Sua estrutura consiste em múltiplas unidades de β -D-glicose ligadas por ligações glicosídicas α :1 $\rightarrow$ 4. A classificação da maltodextrina está associada ao seu valor de equivalente de dextrose, que indica o número de resíduos de glicose em sua molécula de dextrina (LOURENÇO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2020). Ela é escolhida amplamente devido à sua alta solubilidade em água, baixa viscosidade com alto conteúdo de sólidos e capacidade de criar matrizes de parede densas, proporcionando proteção contra a oxidação de materiais encapsulados (KWAK, 2014; MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023). Além disso, é facilmente digerida devido à sua estrutura composta por unidades de glicose mais simples (ANANDHARAMAKRISHNAN; PADMA ISHWARYA, 2015) e é eficaz na encapsulação de materiais hidrofílicos, como antocianidinas e ácido gálico (LAUREANTI et al., 2023).

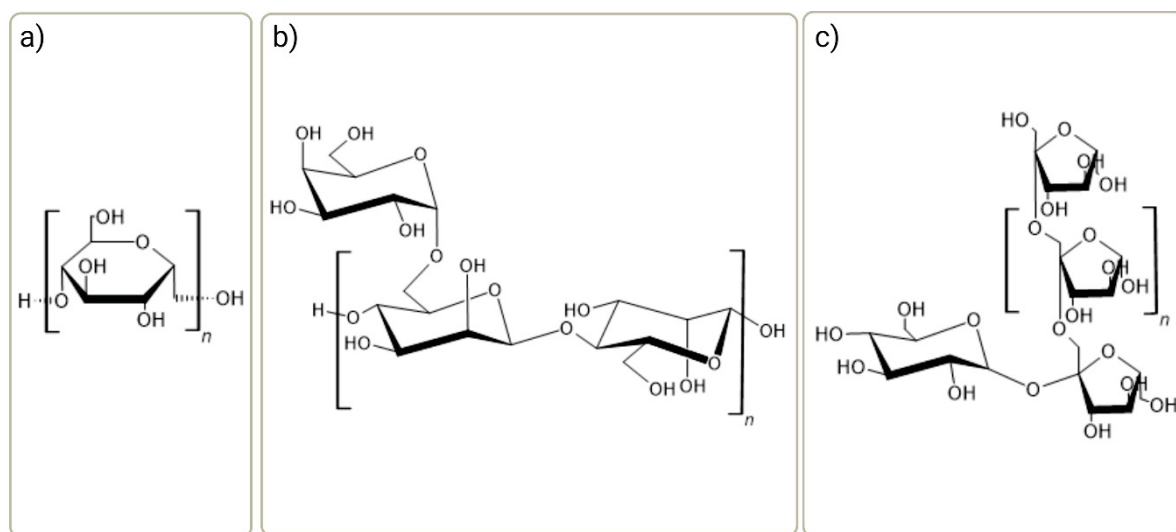
As gomas hidrofílicas, outro grupo relevante de materiais de parede, apresentam propriedades favoráveis na formação de filmes e emulsificação (LU et al., 2021). Dentro desse conjunto, destaca-se a goma arábica, também conhecida como goma acácia, um exsudato vegetal originado das plantas pertencentes à família Acacia, especificamente as árvores *Acacia senegal* e *Acacia seyal* (BURNSIDE, 2014). A goma arábica é um biopolímero composto por ácido D-glucurônico, L-ramnose, D-galactose e L-arabinose, com conteúdo de proteína associada estimado em cerca de 2% (CORRÊA-FILHO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2019). Ela é reconhecida por suas excelentes propriedades emulsificantes, alta solubilidade, baixa viscosidade em soluções aquosas e capacidade de retenção de compostos voláteis (MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023). Além disso, fornece uma barreira semipermeável contra oxigênio, dióxido de carbono, umidade e movimento de solutos, reduzindo a perda de água e a taxa de oxidação dos produtos encapsulados (HALAHLAH et al., 2023).

Uma tendência emergente na indústria de alimentos é o uso de polissacarídeos inovadores que, além de sua sustentabilidade, apresentam benefícios à saúde. Entre esses polissacarídeos, a inulina, um tipo de polissacarídeo de fibra alimentar, se destaca. A inulina é composta de unidades D-frutossil lineares ligadas por β -(2 $\rightarrow$ 1) à porção frutossil da sacarose, com variações no grau de polimerização e ramificações ao longo da cadeia (HALAHLAH et al., 2023). A inulina possui benefícios,

incluindo nutrição de bactérias intestinais benéficas, redução do risco de doenças gastrointestinais, regulação da glicemia, promoção da absorção de minerais, melhoria do sistema imunológico, prevenção da osteoporose e redução do risco de obesidade e níveis de colesterol (CORRÊA-FILHO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2019). Sua moderada solubilidade em água a torna adequada para adição a meios aquosos, embora seja aconselhável preparar soluções com água morna para evitar o aumento da viscosidade e a hidrólise. A inulina também é reconhecida por suas baixas propriedades emulsificantes, frequentemente requerendo combinação com outros materiais de parede (HALAHLAH et al., 2023).

Na FIGURA 6 são ilustradas as estruturas tanto da maltodextrina quanto da goma arábica e da inulina.

FIGURA 6 – ESTRUTURAS QUÍMICAS DA MALTODEXTRINA (a), GOMA ARÁBICA (b) E INULINA (c)



FONTE: A autora (2024). As estruturas químicas foram desenhadas com o software ChemSketch®.

A combinação de materiais de parede tem sido explorada em estudos recentes para otimizar a eficiência do processo de encapsulação (LAUREANTI et al., 2023). Polissacarídeos desempenham um papel significativo na mistura de materiais de parede, enquanto a escolha e concentração dos agentes encapsulantes afetam a eficiência do processo, bem como a morfologia das cápsulas (DÍAZ-MONTES, 2023). Os polissacarídeos, caracterizados pela presença de múltiplos grupos -OH em suas estruturas, proporcionam a capacidade de interagir tanto entre si quanto com outras

moléculas, incluindo água e os próprios materiais encapsulados (DÍAZ-MONTES, 2023).

Juntamente com a seleção do material de revestimento das micropartículas, a escolha das técnicas de encapsulação desempenha um papel determinante na eficiência do processo, na estabilidade das micropartículas, na manutenção das propriedades da matriz e na cinética de liberação dos compostos bioativos (MEHTA et al., 2022). Dentre as diversas técnicas utilizadas na microencapsulação de compostos bioativos, destacam-se a secagem por pulverização, a liofilização, a precipitação de fluido supercrítico, a evaporação de solvente, a coacervação complexa, o aprisionamento lipossomal, a gelificação iônica, a polimerização interfacial e a complexação de inclusão molecular (OZKAN et al., 2019).

A secagem por pulverização e a liofilização são os dois métodos mais comuns para secar produtos alimentícios sensíveis ao calor, incluindo bioativos como vitaminas, antioxidantes e pigmentos naturais (JAFARI et al., 2023a). Embora a secagem por pulverização seja amplamente adotada, é suscetível à degradação de compostos termossensíveis devido às elevadas temperaturas empregadas. A seguir, serão discutidas as particularidades e implicações de cada um desses métodos.

2.3.3 Técnicas de microencapsulação

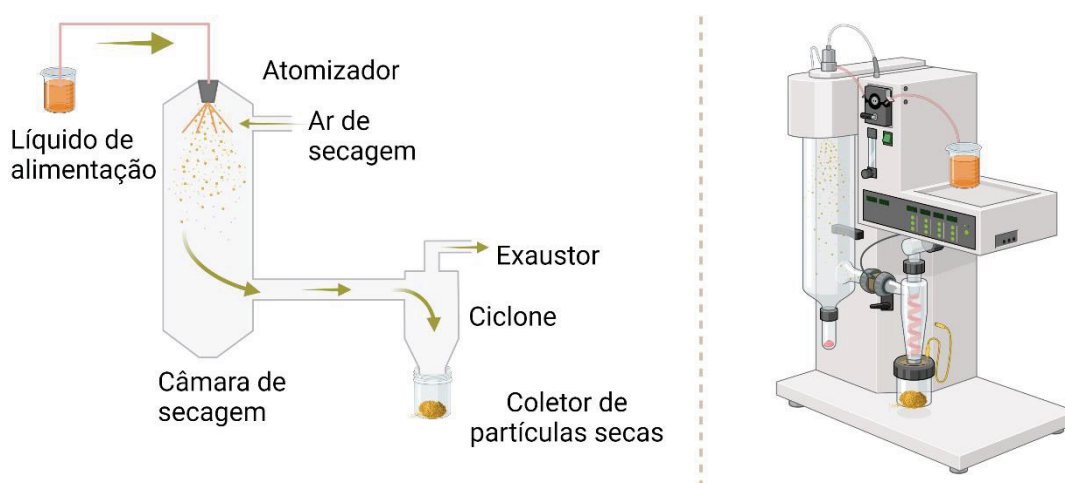
2.3.3.1 Microencapsulação por secagem por pulverização

A secagem por pulverização é a técnica mais amplamente utilizada na encapsulação a nível industrial (DÍAZ-MONTES, 2023). Esta técnica pode ser aplicada para converter soluções líquidas contendo agentes de revestimento e compostos fenólicos em pós de micropartículas secas (MUNIN; EDWARDS-LÉVY, 2011).

O processo tem início com a dissolução e emulsificação da dispersão do composto do núcleo nas soluções do material carreador (MEHTA et al., 2022). Posteriormente, o líquido de alimentação é atomizado em uma câmara de secagem usando um atomizador, que pode ser do tipo pneumático, disco giratório, bico de fluido, bico de pressão ou bico sônico (DÍAZ-MONTES, 2023). A fragmentação do líquido em gotículas aumenta substancialmente a área superficial do líquido, acelerando o processo de secagem e reduzindo as resistências internas à transferência de umidade (ANANDHARAMAKRISHNAN; PADMA ISHWARYA, 2015).

O gás aquecido (ar ou nitrogênio) entra em contato com a alimentação atomizada por meio de um dispersor de gás (RAHAIEE et al., 2020). As diferenças de temperatura facilitam a transferência de massa do líquido para o gás, e o líquido sai do equipamento na forma de vapor (DÍAZ-MONTES, 2023). À medida que o líquido evapora rapidamente das gotículas, as partículas se formam e precipitam no fundo da câmara, sendo coletadas em um ciclone (RAHAIEE et al., 2020). A FIGURA 7 ilustra o equipamento utilizado no processo de secagem por pulverização.

FIGURA 7 – ESQUEMA DO *SPRAY DRYER*



FONTE: A autora (2024). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: AH259LLEZN.

A conformação, a morfologia, a estabilidade e a capacidade de proteção conferida ao material encapsulado nessas micropartículas são influenciadas por uma variedade de parâmetros (DÍAZ-MONTES, 2023). As características das micropartículas podem ser afetadas por vários fatores incluindo temperatura de entrada, temperatura de saída, taxa de bomba, taxa de fluxo de ar e concentração de uma solução (HUANG; YUAN; BAOJUN, 2023).

A etapa de atomização desempenha um papel fundamental durante o processo de secagem por pulverização, uma vez que exerce um impacto substancial nas propriedades físicas e químicas dos materiais encapsulados. Viscosidade, tamanho das gotas, densidade, tensão interfacial, tipo de bico atomizador e velocidade de rotação afetam a taxa de aglomeração e as propriedades de reidratação dos encapsulados. A alta viscosidade prejudica o comportamento do fluxo, pois o

atomizador não pode operar acima da viscosidade máxima adequada para o processamento, enquanto uma viscosidade excessivamente baixa aumenta o consumo de energia e os custos operacionais da secagem por pulverização (MUHOZA et al., 2023).

A temperatura de entrada excessivamente baixa resulta em uma taxa de secagem deficiente e propriedades físico-químicas inadequadas dos encapsulados, enquanto uma temperatura de saída elevada pode provocar a degradação dos compostos bioativos. Portanto, a temperatura de entrada deve ser ajustada para permitir a formação rápida de uma camada protetora sobre os compostos bioativos, evitando a degradação e promovendo uma alta taxa de retenção. O monitoramento cuidadoso da temperatura de saída é fundamental para a produção de pó com baixa umidade, estrutura superficial de partícula ideal, alta eficiência de encapsulação e baixa taxa de aglomeração (MUHOZA et al., 2023).

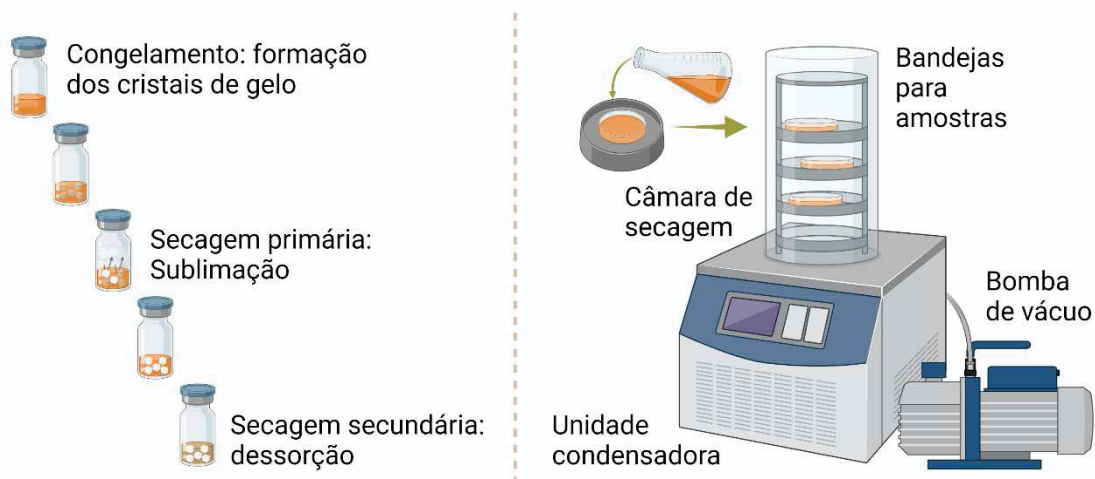
A técnica de secagem por pulverização fornece uma série de vantagens notáveis no contexto da engenharia de alimentos. Entre as suas principais características, destacam-se a rápida evaporação da água, a capacidade de operação contínua, a flexibilidade em termos de configurações de secador, alta taxa de produção, a produção de produtos com boa qualidade, alta eficiência de encapsulação e a sua adaptabilidade para diversos tipos de materiais (HUANG; YUAN; BAOJUN, 2023). Além disso, essa técnica é potencialmente viável para a produção em escala industrial, o que a torna uma opção atraente para a indústria de alimentos (DÍAZ-MONTES, 2023; KOOP et al., 2022). No entanto, é fundamental salientar que as elevadas temperaturas exigidas (140-180 °C) para evaporar a fase líquida durante o processo de secagem podem resultar na degradação térmica dos compostos bioativos (KOOP et al., 2022).

2.3.3.2 Microencapsulação por liofilização

A técnica de liofilização, ilustrada na FIGURA 8, é um processo que compreende o congelamento de uma solução ou suspensão, seguido pela sublimação direta da fase sólida (RAHAIEE et al., 2020). Este processo é caracterizado por três etapas distintas: congelamento, secagem primária e secagem secundária. Durante o congelamento, a água é transformada em cristais de gelo a temperaturas inferiores a zero graus Celsius, dependendo de fatores como a concentração inicial do soluto na

solução, grau de super-resfriamento e ponto de congelamento. Para alcançar esse estágio, ocorre a remoção do calor do produto para reduzir sua temperatura, seguida pela remoção do calor latente de cristalização, resultando na formação dos cristais de gelo (ANANDHARAMAKRISHNAN; PADMA ISHWARYA, 2015).

FIGURA 8 – ESQUEMA DO LIOFILIZADOR



FONTE: A autora (2024). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: TQ259LLRZK.

A etapa subsequente, conhecida como secagem primária, é onde ocorre a sublimação do gelo formado durante o congelamento. Este processo é endotérmico e se desenvolve a pressões inferiores ao ponto triplo da água. A entalpia de sublimação, neste contexto, é a soma do calor latente de fusão e o calor latente de vaporização. Por outro lado, a secagem secundária envolve a eliminação da água descongelada a temperaturas mais elevadas em comparação com a secagem primária. Ao término desse processo, o produto apresenta uma umidade residual de aproximadamente 2 a 10% no caso de alimentos (ANANDHARAMAKRISHNAN; PADMA ISHWARYA, 2015).

As condições de congelamento e secagem exercem um impacto substancial nas propriedades físico-químicas e na estabilidade dos produtos em pó resultantes (MUHOZA et al., 2023). Para ilustrar, o congelamento rápido promove a formação uniforme de cristais de gelo, a preservação da estrutura original e a melhoria das propriedades de reidratação. Por outro lado, o congelamento lento pode resultar na

formação de cristais de gelo maiores, prejudicando a integridade da matriz original e produzindo um pó de reidratação insatisfatório (MUHOZA et al., 2023).

A liofilização, devido às suas características operacionais, revela-se particularmente adequada para a preservação de compostos bioativos sensíveis, uma vez que opera em condições de baixas temperaturas e baixo teor de oxigênio (KOOP et al., 2022). No entanto, a aplicação desta abordagem enfrenta desafios, como a limitação de controle sobre o tamanho das partículas (OZKAN et al., 2019), seu custo elevado em comparação com a secagem por pulverização, o extenso tempo de processamento e a consequente alta porosidade, que não constitui uma barreira muito eficiente entre o ativo e o seu entorno em geral (MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023). É importante observar que a estrutura porosa comumente presente nas micropartículas após o processo de liofilização pode ter o efeito de acelerar a liberação dos compostos bioativos (HUANG; YUAN; BAOJUN, 2023).

2.3.4 Microencapsulação por secagem por liofilização de compostos bioativos de frutas

Na TABELA 4 estão sintetizados estudos que investigaram a aplicação da secagem por liofilização para a microencapsulação de compostos bioativos obtidos a partir de frutas. Os estudos estão categorizados com base nos materiais encapsulados, nos materiais de revestimento empregados, nas proporções entre o núcleo e o material de revestimento, nas condições operacionais e nos principais resultados, incluindo aspectos relacionados à morfologia, cor, rendimento, eficiência e preservação dos compostos bioativos.

Até o momento, não foram encontrados estudos publicados que tenham investigado a microencapsulação do extrato de uvaia utilizando maltodextrina, goma arábica e inulina, individualmente ou em combinação. Contudo, com base na discussão anterior, as técnicas de extração assistida por ultrassom e homogeneização de alta velocidade, juntamente com a microencapsulação por secagem por liofilização, revelam um significativo potencial para a produção de micropartículas ricas em compostos bioativos a partir dos resíduos da uvaia, representando uma promissora alternativa para valorizar esses resíduos.

TABELA 4 – ESTUDOS DE MICROENCAPSULAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS DE FRUTAS POR SECAGEM POR LIOFILIZAÇÃO REPORTADOS NA LITERATURA CIENTÍFICA

Material do núcleo	Material de revestimento	Proporção núcleo:revestimento	Condições operacionais	Principais resultados e conclusões	Referência
Extrato de resíduo de mamão (casca e sementes)	Maltodextrina	1:2 (extrato:Solução de revestimento, m/m) Soluções de revestimento: maltodextrina em água (10%, 20% e 30% m/v)	Liofilização a -40 °C por 24 h	- Pós com 20% e 10% exibiram as maiores concentrações de fenólicos e flavonoides, respectivamente - Pós com capacidades antioxidantes altas e capacidade de diminuir os níveis intracelulares de ERRO	Fuentes et al. (2023)
Suco de mirtilo	Misturas de maltodextrina e goma arábica em diferentes proporções	70:30 (suco:revestimento, m/m)	Congelamento a -24 °C por 24 h/ Liofilização a 60 °C e 0,01 mbar por 72 h	- Pós com baixa umidade (< 5%) e $a_w < 0,3$, alta solubilidade (> 91%) e fluidez - Maltodextrina favoreceu solubilidade, fluidez e um aumento da recuperação de fenólicos totais	Estupiñán-amaya, Fuenmayor e López-córdoba (2022)
Extrato etanólico de maracujá (casca)	Amido ceroso (WS), goma arábica (GA) e maltodextrina (MT)	Extratos foram misturados independentemente com GA, WS e MT (10% m/v)	Congelamento a -20 °C por 24 h/ Liofilização a -55 °C e 0,1 mbar por 48 h	Pós com GA e MT apresentaram melhores propriedades físicas, fitoquímicas e antioxidantes, que incluíram rendimento, sólidos solúveis totais, solubilidade, densidade aparente, CFT, FRAP e cor	Kobo, Kaseke e Fawole (2022)
Polpa de araçá vermelho	Misturas de amido hidrolisado de pinhão (AHP), gomas tara (GT) e arábica (GA) em proporções iguais	1:1 (polpa:revestimento, m/m)	Congelamento a -80 °C/ Liofilização até o equilíbrio	- Eficiência de encapsulação: 80,4% para carotenóides com AHP, GT e GA - Eficiência de encapsulação: 76% para antocianinas com GT e GA - Maior conteúdo fenólico total: 891,33 g EAG 100 g⁻¹ (BS) com AHP - Análise morfológica mostrou aglomeração e partículas irregulares, mas uniformidade foi obtida ao combinar os três materiais	Rosário et al. (2021)

Polpas de mirtilo, groselha preta, sabugueiro e maqui berry	Maltodextrina (DE 10) e goma arábica (80:20, m/m)	20% de encapsulantes diretamente na polpa	Congelamento a -20 °C por 24 h/ Liofilização a -40 °C e vácuo de 100 µmHg por 40 h	- Pós apresentaram altos níveis de retenção de compostos bioativos, proporcionando entre 68,2 e 99,6% de retenção de polifenóis e antocianinas - A cor manteve-se estável durante 60 dias de armazenamento a 38 °C	Casati, Baeza e Sánchez (2019)
Polpa de juçara	Maltodextrina (DE 16,5 a 19,5) e goma arábica (1:1, m/m)	2:3 e 2:1 (polpa:revestimento, m/m)	Congelamento a -80 °C/ Liofilização até o equilíbrio	- Mistura 2:1 resultou em uma concentração de antocianina de 117 ± 4 (mg 100 g⁻¹), enquanto a mistura 2:3 resultou em 152 ± 1 (mg 100 g⁻¹) - Pós obtidos na proporção de 2:3 apresentaram maior resistência à degradação com o aumento da temperatura	Mazuco et al. (2018)
Extrato aquoso de jabuticaba (casca)	Maltodextrina ou maltodextrina (99,5%) e goma xantana (0,5%).	1:1 (extrato:revestimento, m/m)	Temperatura de congelamento: -10 °C por 48 h/ Liofilização por 30 h	- Micropartículas mostraram menor degradação (2,82% de compostos fenólicos e 14,5% de antocianinas monoméricas) em comparação com o extrato liofilizado sob luz e a 25 °C - Pó com maltodextrina e goma xantana teve variações menores na diferença total de cor - A estabilidade da cor do pó com maltodextrina melhorou quando incorporado em gelatina e permaneceu estável no escuro	Rodrigues et al. (2018a)
Extrato do subproduto da jabuticaba	Maltodextrina ou maltodextrina (99,5%) e goma xantana (0,5%).	1:1 (extrato:revestimento, m/m)	Temperatura de congelamento: -18 °C por 48 h/ Liofilização por 30 h	- Microencapsulação protegeu as antocianinas monoméricas e os compostos fenólicos, principalmente em pH 6,5 - Amostras de maria-mole incorporadas com micropartículas apresentaram menor diferença de cor durante o armazenamento	Rodrigues et al. (2018a)

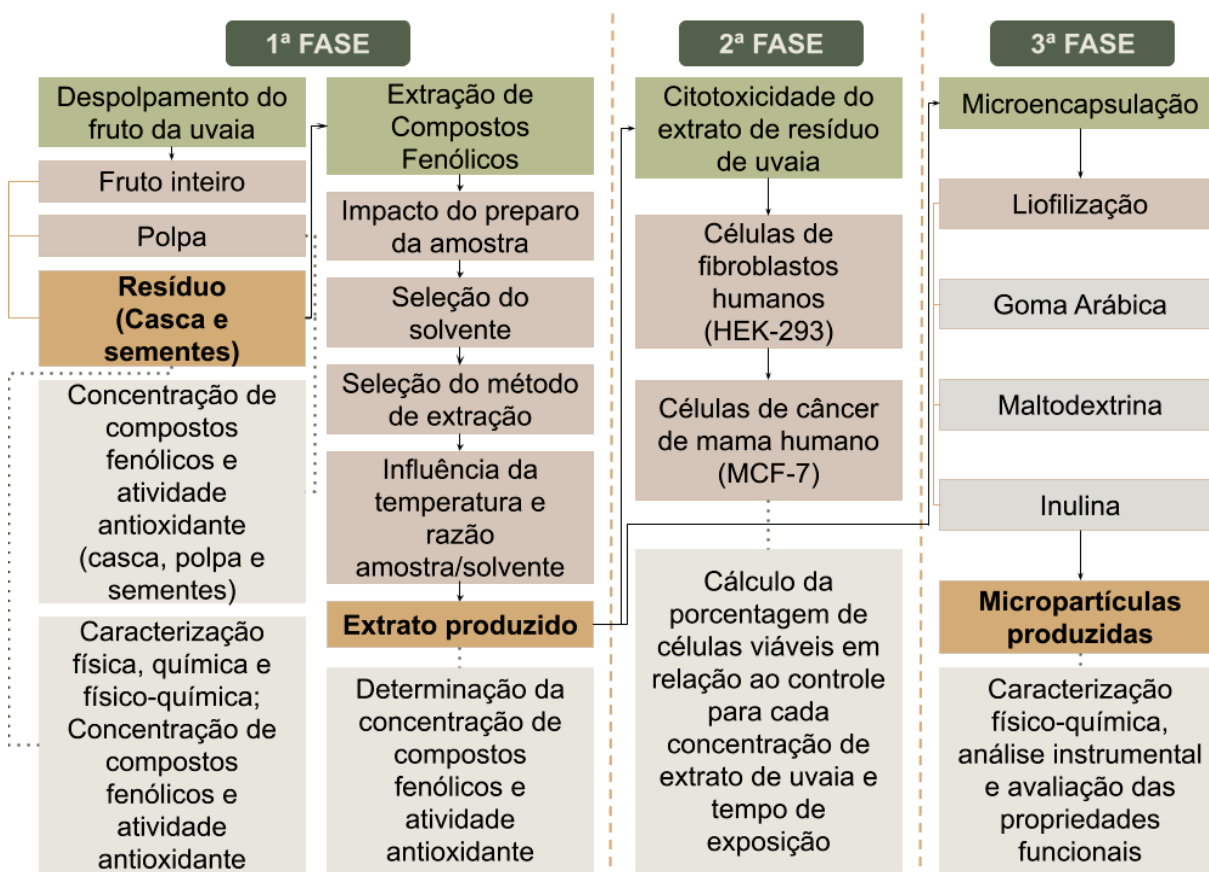
Extrato aquoso de subproduto de amora-preta	Maltodextrina (DE 10 e 20)	Revestimento adicionado diretamente ao extrato concentrado para obter 30% de concentração de sólidos totais	Liofilização até o equilíbrio	Melhores resultados com a maltodextrina DE 10, quanto à retenção de antocianinas no processo de secagem, higroscopicidade, umidade, acidez, atividade de água e cor	Yamashita et al. (2017)
---	----------------------------	---	-------------------------------	---	-------------------------

EAG – Equivalentes de ácido gálico. DE – Dextrose equivalente. DP – Grau de polimerização.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve a metodologia adotada no presente estudo, composta por três fases inter-relacionadas, como demonstrado na Figura 9.

FIGURA 9 – FLUXOGRAMA GERAL DO ESTUDO



FONTE: A autora (2024).

Na primeira fase, realizou-se a quantificação de compostos fenólicos e a avaliação da atividade antioxidante em diferentes frações da uvaia (casca, polpa e sementes). Posteriormente, foi conduzida uma caracterização abrangente dos resíduos de uvaia (casca e sementes), englobando análises físico-químicas, além da avaliação da concentração de compostos fenólicos e atividade antioxidante. Na etapa subsequente, procedeu-se à extração de compostos fenólicos desses resíduos, incluindo o pré-preparo da matéria-prima, a determinação do solvente mais eficaz e a seleção do método de extração. Esta fase abrangeu a investigação da influência da temperatura de extração e da razão amostra/solvente na eficiência da extração fenólica.

Na segunda fase, avaliou-se a citotoxicidade do extrato de resíduo de uvaia produzido. Para isso, utilizaram-se células de fibroblastos humanos HEK293 e células de câncer de mama humano MCF-7, mantidas em meios específicos. A viabilidade celular foi determinada por meio de um ensaio colorimétrico, no qual as células foram expostas a concentrações crescentes de extrato de uvaia por 24 e 72 h, sendo a absorbância medida para determinar a porcentagem de células viáveis em relação ao controle.

Na terceira fase, procedeu-se à microencapsulação do extrato por meio da técnica de secagem por liofilização, utilizando goma arábica, maltodextrina e/ou inulina como agentes encapsulantes. As micropartículas resultantes foram submetidas à caracterização físico-química, análise instrumental e avaliação de suas propriedades funcionais.

3.1 PRODUTOS QUÍMICOS, REAGENTES E SOLUÇÕES

O ácido gálico, ácido acético glacial, persulfato de potássio e cloreto de ferro (III) foram obtidos da Êxodo Científica (Sumaré, São Paulo, Brasil). O ácido clorídrico foi adquirido da Vetec Química Fina LTDA (Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil), enquanto o carbonato de sódio foi fornecido pela Dinâmica Química Contemporânea LTDA (Indaiatuba, São Paulo, Brasil). A Synth (Diadema, São Paulo, Brasil) forneceu etanol, acetonitrila, acetato de sódio e hexano.

Os reagentes empregados nos ensaios antioxidantes, como Folin-Ciocalteu, DPPH, ABTS, Trolox e TPTZ, juntamente com os padrões analíticos dos compostos fenólicos estudados (com pureza $\geq 98\%$), foram adquiridos na Sigma Aldrich Chemical Co. (St. Louis, Missouri, EUA). As enzimas (α -amilase da saliva humana (A1031, atividade: 300–1500 unidades mg^{-1} de proteína), pepsina da mucosa gástrica suína (P7012, atividade: ≥ 2500 unidades mg^{-1} de proteína) e pancreatina suína (P7545, atividade: $8 \times \text{USP}$) e os sais biliares (B8631) também foram adquiridos na Sigma Aldrich.

Para os ensaios de viabilidade celular, foram utilizados o meio de cultivo DMEM alta glicose (11965118), soro fetal bovino (12657029), penicilina-streptomicina (10.000 U mL^{-1}) (15140122) e anfotericina B (15290026), todos adquiridos da Gibco™ (Waltham, Massachusetts, EUA), além do reagente MTT (M6494) obtido da Invitrogen™ (Waltham, Massachusetts, EUA). Os agentes encapsulantes,

maltodextrina (DE 10), goma arábica e inulina, foram obtidos da Ingredion (São Paulo, São Paulo, Brasil), Neon (Suzano, São Paulo, Brasil) e Sweetmix (Sorocaba, São Paulo, Brasil), respectivamente. Para os ensaios de sensibilidade aos antimicrobianos, foram utilizados caldo Brain Heart Infusion (BHI) e ágar Mueller-Hinton, ambos fornecidos pela Kasvi (Pinhais, Paraná, Brasil). A água ultrapura foi obtida de um sistema de purificação Gehaka (São Paulo, São Paulo, Brasil).

Todos os reagentes e solventes utilizados eram de grau analítico ou para cromatografia líquida de alta eficiência.

3.2 MATÉRIA-PRIMA

3.2.1 Preparo da amostra

Os frutos de *Eugenia pyriformis* Cambess foram coletados em março de 2023 em uma propriedade rural em Urupema, Santa Catarina, Brasil (latitude 28°04'55,2"S e longitude 49°56'16,0"O). O resíduo de uvaia, composto por cascas e sementes, foi obtido por meio de uma despulpadeira industrial (Brameitar, Campinas, São Paulo, Brasil). O lote resultante foi dividido em três partes para processamento subsequente.

A primeira parte foi submetida ao congelamento rápido a -80 °C por 24 h em um ultrafreezer (CL120-80V, ColdLab, Piracicaba, São Paulo, Brasil), seguido de liofilização por 8 h, com a unidade condensadora operando a -55 °C, em um liofilizador de bancada (LS, Terroni, São Carlos, São Paulo, Brasil). A segunda parte foi seca em uma estufa com circulação forçada de ar (SSDcr-54 L, SolidSteel, Piracicaba, São Paulo, Brasil) a 40 °C por 72 h. A terceira parte não foi submetida a processos de secagem, sendo designada como "*in natura*".

Cada parte supracitada foi triturada e homogeneizada em um multiprocessador de alimentos (RI7630, Philips Walita, Varginha, Minas Gerais, Brasil). Para garantir partículas de tamanho uniforme, os resíduos secos foram separados usando peneiras com malhas de 14 e 60 *mesh* (Bertel Indústria Metalúrgica Ltda, Caieiras, São Paulo, Brasil). Inicialmente, foi utilizada a peneira de 14 *mesh* e, posteriormente, a de 60 *mesh*. Desta forma, os resíduos retidos na peneira de 14 *mesh* consistem em partículas maiores do que a abertura da peneira de 60 *mesh*. Por outro lado, os resíduos retidos na peneira de 60 *mesh* incluem todas as partículas que passaram por essa peneira. Na FIGURA 10 estão ilustrados os frutos de uvaia inteiros,

bem como as amostras de resíduos em seu estado natural, submetidos à secagem em estufa e ao processo de liofilização.

FIGURA 10 – REPRESENTAÇÕES VISUAIS DOS FRUTOS DE UVAIA INTEIROS, RESÍDUOS *IN NATURA*, SECOS EM ESTUFA E LIOFILIZADOS



FONTE: A autora (2024).

Uma porção dos frutos de uvaia inteiros foi reservada para análise da atividade antioxidante e dos compostos fenólicos presentes na casca, polpa e sementes. Essas frações foram separadas manualmente, congeladas rapidamente a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h (CL120-80V, ColdLab, Piracicaba, São Paulo, Brasil) e liofilizadas por 8 h a $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LD 3000, Terroni, São Carlos, São Paulo, Brasil) antes de serem moídas em um almofariz com pistilo.

Todas as amostras, incluindo fruto inteiro, polpa, casca, semente e resíduos de uvaia *in natura*, secos em estufa e liofilizados, foram armazenadas em embalagens de polietileno seladas a vácuo, protegidas da exposição à luz e conservadas em um freezer doméstico a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ até a realização das análises.

3.2.2 Caracterização físico-química

3.2.2.1 Composição química e análises físico-químicas

Para determinar a composição química do resíduo de uvaia *in natura*, foram conduzidas análises para avaliação dos parâmetros de umidade, cinzas, proteínas, lipídios e carboidratos, os quais foram expressos em % (m/m) BU.

A determinação da umidade foi realizada por meio do método gravimétrico, utilizando uma estufa a vácuo (SL-104, SOLAB, Piracicaba, São Paulo, Brasil) a 70 °C por 24 h, conforme diretrizes do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). A diferença de massa antes e após a secagem foi empregada para calcular a umidade.

Os sólidos totais foram quantificados pela diferença entre a massa total da amostra e a umidade obtida anteriormente. As cinzas totais foram determinadas pela medição da massa residual após a incineração em mufla a 550 °C (M25097, Quimis, Diadema, São Paulo, Brasil), seguindo as orientações do IAL (2008).

O conteúdo proteico foi determinado pelo método de Kjeldahl, o qual estabelece a concentração de nitrogênio presente na amostra, utilizando um fator de conversão de 6,25. A concentração de lipídios foi obtida pelo método de extração com solvente éter de petróleo em um aparelho Soxhlet, com prévia hidrólise ácida, conforme protocolos do IAL (2008).

A quantificação de carboidratos foi realizada por diferença, subtraindo-se os conteúdos de proteínas, lipídios, água e cinzas da composição total da amostra (100%). Os sólidos solúveis (° Brix) foram determinados por meio de um refratômetro digital com compensação automática de temperatura (HI 96801, Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, EUA), seguindo as diretrizes da AOAC (2019).

A acidez total titulável foi avaliada por titulação com indicador, expressando os resultados em gramas de ácido cítrico por 100 gramas de amostra na base úmida (g AC 100 g⁻¹ BU), conforme especificações do IAL (2008). O pH das amostras foi medido utilizando um medidor de pH de bancada (K39-1420A, Kasvi, São José dos Pinhais, Paraná, Brasil).

Por fim, a cor da casca do fruto de uvaia foi analisada por meio de um colorímetro portátil (Chroma Meter CR400, Konica Minolta, Tóquio, Japão), empregando iluminante D65 e ângulo de observação de 2°, utilizando o sistema de cores CIE L*a*b*. Este sistema é um espaço de cores tridimensional utilizado para a quantificação e comparação de cores, onde L* indica a luminosidade e a* e b* representam as coordenadas cromáticas (a* = coordenada vermelho/verde (+a indica vermelho e -a indica verde) e b* = coordenada amarelo/azul (+b indica amarelo e -b

indica azul)) (SCHANDA, 2007). As coordenadas L^* , a^* e b^* foram obtidas diretamente pelo equipamento. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.2.2.2 Caracterização morfológica

A caracterização morfológica das amostras foi conduzida por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Inicialmente, as amostras secas foram submetidas a um processo de fixação em fitas de carbono e posteriormente acomodadas em suportes de alumínio. Em seguida, uma fina camada de ouro foi aplicada às amostras. A análise morfológica foi realizada utilizando um microscópio eletrônico de varredura (JSM-6390 LV, Jeol USA Inc., Peabody, Massachusetts, EUA). As micrografias foram capturadas com ampliações variando entre 500X e 5000X, empregando feixes de elétrons com uma energia de 10 kV.

3.2.2.3 Determinação da concentração de compostos bioativos e atividade antioxidante

3.2.2.3.1 Determinação da concentração de compostos fenólicos totais

O extrato para determinação do CFT foi preparado conforme descrito por Larrauri, Rupérez e Saura-Calixto (1997). Inicialmente, 1 g da amostra foi combinada com 4 mL de metanol 50% em um tubo Falcon de 50 mL. Após uma hora de repouso em temperatura ambiente, o extrato foi centrifugado a 4000 rpm (2250 g) por 10 min (K14-4000, Kasvi, São José dos Pinhais, Paraná, Brasil). O sobrenadante resultante foi transferido para um balão volumétrico de 10 mL.

O resíduo remanescente passou por uma segunda extração utilizando 4 mL de acetona 70%, repetindo-se o processo de repouso e centrifugação nas mesmas condições anteriores. O sobrenadante obtido nesta segunda extração foi adicionado ao primeiro sobrenadante no balão volumétrico e o volume final foi ajustado para 10 mL utilizando água destilada.

A determinação dos compostos fenólicos totais nos extratos foi realizada por meio do método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, conforme descrito por Singleton, Orthofer, e Lamuela-raventós (1999). Inicialmente, 500 μ L dos extratos foram adicionados a 2,5 mL do reagente Folin-Ciocalteu (0,2 N). Após 5 min, adicionou-se 2 mL de solução de Na_2CO_3 a 7,5% (m/v). A absorbância foi medida a 760 nm em

relação a um branco, após 120 min no escuro, utilizando um espectrofotômetro (UV 1800, Shimadzu, Quioto, Japão). A quantificação foi realizada utilizando uma curva analítica de ácido gálico ($0-200 \text{ mg L}^{-1}$, $R^2=0,9973$) e comparando a medição obtida com essa curva. Todas as análises foram realizadas em triplicata, e os resultados foram expressos em mg equivalentes de ácido gálico por cem gramas de amostra seca ($\text{mg EAG } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$).

3.2.2.3.2 Determinação da atividade antioxidante *in vitro*

A determinação da atividade antioxidante *in vitro* foi conduzida por meio de três ensaios: ABTS^{•+}, FRAP e DPPH[•]. Os extratos foram obtidos previamente, seguindo o procedimento detalhado na seção 3.2.2.3.1.

O ensaio ABTS^{•+} foi realizado seguindo o método descrito por Rufino et al. (2007a). Trinta microlitros de cada amostra foram misturados com 3 mL da solução do radical ABTS^{•+}. Após 6 min, as absorbâncias foram registradas em 734 nm utilizando um espectrofotômetro (UV 1800, Shimadzu, Quioto, Japão). Os resultados foram comparados com uma curva analítica de Trolox ($0-800 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, $R^2=0,9908$).

O ensaio FRAP foi conduzido de acordo com o protocolo descrito por Rufino et al. (2006). Inicialmente, preparou-se a solução FRAP adicionando 100 mL de tampão acetato (0,3 M) a 10 mL de cloreto férrico (20,0 mM) e 10 mL de TPTZ (10,0 mM). Em seguida, 90 μL de cada amostra foram adicionados a 0,27 mL de água destilada e 2,70 mL do reagente FRAP em tubos de ensaio. Após 30 min de incubação a 37 °C, as absorbâncias foram medidas em 595 nm e os resultados foram comparados com uma curva analítica de Trolox ($0-800 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, $R^2=0,9994$).

Por fim, a redução do radical DPPH[•] foi medida através de ensaio espectrofotométrico a 515 nm, seguindo o método descrito por Rufino et al. (2007b). Cem microlitros de cada amostra foram misturados com 3,9 mL de solução etanólica de DPPH (0,06 mM) e, após 30 min de reação, as absorbâncias foram medidas. Os resultados foram comparados a uma curva analítica de Trolox ($0-800 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, $R^2=0,9986$).

Todas as análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram expressos em micromoles de atividade antioxidante equivalente ao Trolox por cem gramas de amostra na base seca ($\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$).

3.3 EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS

3.3.1 Impacto do preparo da amostra e seleção do solvente de extração

Com base nos resultados das análises de CFT e atividades antioxidantes (ABTS^{•+}, DPPH[•] e FRAP) das diferentes formas de matéria-prima (resíduos *in natura*, seco em estufa (14 e 60 *mesh*) e liofilizado (14 e 60 *mesh*)) identificaram-se as amostras mais apropriadas para a extração de compostos fenólicos. Subsequentemente, procedeu-se com experimentos destinados a determinar o solvente mais adequado para a extração desses compostos fenólicos a partir dos resíduos selecionados. Cinco solventes, geralmente reconhecidos como seguros (GRAS) pela Food And Drug Administration (FDA), foram selecionados, a saber: (i) água destilada, (ii) água destilada acidificada com ácido acético (1%), (iii) solução de etanol:água (20:80 v/v), (iv) solução de etanol:água (50:50 v/v) e (v) solução de etanol:água (80:20 v/v). Procurou-se usar solventes simples, encontrados em abundância (água) ou obtidos a partir de fontes renováveis (etanol), devido à sua sustentabilidade e compatibilidade com padrões de segurança alimentar.

Todas as extrações foram conduzidas empregando o método de extração assistida por agitação magnética (EAAM). No caso dos ensaios com resíduo liofilizado, a proporção de 1:10 (g mL⁻¹) de sólido para solvente foi adotada, com base em estudos anteriores (MEREGALLI et al., 2020; RAMOS et al., 2017). Para os ensaios com resíduo *in natura*, a proporção de 3,5:10 (g mL⁻¹) foi selecionada para assegurar quantidades aproximadas de matéria seca em cada amostra. A temperatura constante de 35 °C foi mantida em todos os ensaios, sendo uma temperatura média frequentemente utilizada para extração de compostos termossensíveis.

A preparação das amostras envolveu a mistura dos resíduos com os solventes de extração (10 mL), transferindo-se a solução resultante para béqueres de 50 mL. A EAAM foi realizada utilizando um agitador magnético com aquecimento (IKA C-MAG HS 7, IKA-Works, Staufen, Baden-Württemberg, Alemanha) a uma velocidade de 500 rpm por um período de 30 min. Após os tratamentos, os extratos foram submetidos à centrifugação a 4000 rpm (2250 g) por 10 min (K14-4000, Kasvi, São José dos Pinhais, Paraná, Brasil). Posteriormente, as suspensões foram coletadas e imediatamente submetidas a análises de CFT, conforme descrito na seção 3.2.2.3.1. Todas as

análises foram realizadas em triplicata. A TABELA 5 apresenta as combinações específicas de matéria-prima e solventes empregadas em cada experimento.

TABELA 5 – ESTUDOS DE SELEÇÃO DO SOLVENTE PARA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DOS RESÍDUOS DE UVAIA

Amostra	Peneira (mesh)	Solvente	Proporção sólido (g mL ⁻¹)	Método de extração	T (°C)
Resíduo <i>in natura</i>	-	Água	3,5/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	14	Água	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	60	Água	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo <i>in natura</i>	-	Água acidificada (1% ácido acético)	3,5/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	14	Água acidificada (1% ácido acético)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	60	Água acidificada (1% ácido acético)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo <i>in natura</i>	-	Solução etanol:água (20:80 v/v)	3,5/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	14	Solução etanol:água (20:80 v/v)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	60	Solução etanol:água (20:80 v/v)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo <i>in natura</i>	-	Solução etanol:água (50:50 v/v)	3,5/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	14	Solução etanol:água (50:50 v/v)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	60	Solução etanol:água (50:50 v/v)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo <i>in natura</i>	-	Solução etanol:água (80:20 v/v)	3,5/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	14	Solução etanol:água (80:20 v/v)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	60	Solução etanol:água (80:20 v/v)	1/10	Agitação magnética	35

3.3.2 Seleção do método de extração

Após a seleção da matéria-prima e do solvente de extração, procedeu-se à avaliação de três métodos distintos para a recuperação dos compostos fenólicos presentes nos resíduos de uvaia. Os métodos submetidos a análise foram os seguintes: (i) Extração Assistida por Agitação Magnética (EAAM), (ii) Extração Assistida por Ultrassom em Banho (EAU-B) e (iii) Extração Assistida por homogeneizador de alta velocidade (EAH). A relação utilizada para a mistura sólido-solvente foi de 1:10 (g mL⁻¹). As amostras foram preparadas mediante a combinação dos resíduos com 20 mL de solvente de extração.

No caso da EAU-B, a mistura foi transferida para um recipiente Falcon de 50 mL e submetida a um banho ultrassônico (Q3.0 25A, Eco-sonics Indaiatuba, São Paulo, Brasil) operando a 25 kHz e 120 W. A EAH foi conduzida utilizando um homogeneizador Ultra-Turrax (T25, IKA-Works, Staufen, Baden-Württemberg, Alemanha) operando a 4000 rpm e 800 W, conectado a um banho de aquecimento. A velocidade de rotação foi ajustada para assegurar a homogeneização eficaz da mistura dentro do tubo Falcon, prevenindo derramamentos. Para fins de comparação, a EAAM foi realizada sob as mesmas condições em béqueres de 50 mL, utilizando um agitador magnético com aquecimento (IKA C-MAG HS 7, IKA-Works, Staufen, Baden-Württemberg, Alemanha) a 500 rpm.

A cinética de extração dos compostos fenólicos foi monitorada em intervalos de tempo específicos (2, 4, 6, 8, 10, 20, 25, 40 e 60 min). Após cada período, as amostras foram filtradas a vácuo e os filtrados resultantes foram imediatamente submetidos a análises para a determinação do CTF, conforme detalhado na seção 3.2.2.3.1. Todas as análises foram realizadas em triplicata. Ao final do processo de extração, os resíduos remanescentes das filtrações foram congelados rapidamente a -80 °C por 24 h (CL120-80V, ColdLab, Piracicaba, São Paulo, Brasil), liofilizados por 8 h, com a unidade condensadora a -55 °C (LD 3000, Terroni, São Carlos, São Paulo, Brasil) e, posteriormente, analisados por MEV, conforme descrito na seção 3.2.2.2. Na TABELA 6 é apresentado um compilado das combinações específicas de matéria-prima, solvente de extração e método utilizadas em cada experimento.

TABELA 6 – ESTUDOS DE SELEÇÃO DO MÉTODO PARA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DOS RESÍDUOS DE UVAIA

Amostra	Peneira (<i>mesh</i>)	Solvente	Proporção sólido (g mL ⁻¹)	Método de extração	T (°C)
Resíduo liofilizado	60	Solução etanol: água (50:50 v/v)	1/10	Agitação magnética	35
Resíduo liofilizado	60	Solução etanol: água (50:50 v/v)	1/10	Assistida por ultrassom de banho	35
Resíduo liofilizado	60	Solução etanol: água (50:50 v/v)	1/10	Assistida por ultra- homogeneizador	35

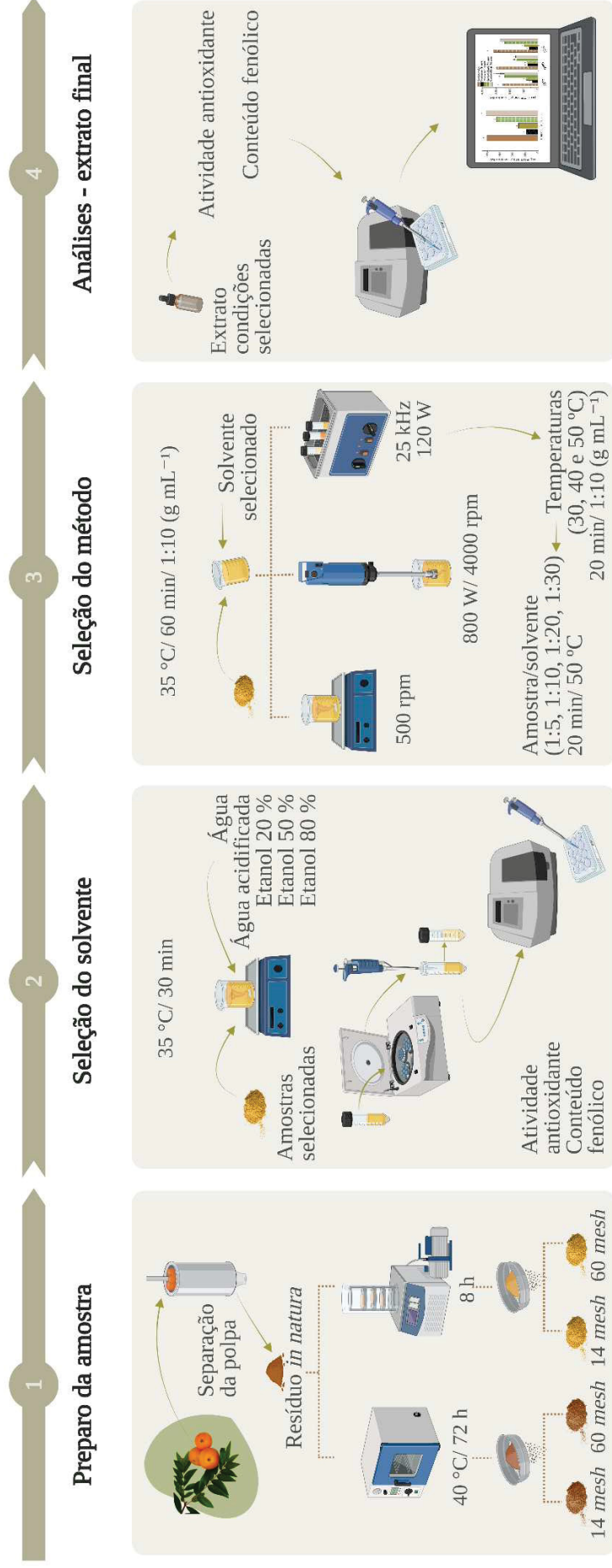
3.3.3 Influência da temperatura de extração e razão amostra/solvente

Após a seleção do método de extração, procedeu-se à realização de ensaios semelhantes aos delineados na seção 3.3.2 visando investigar o impacto da temperatura na extração de compostos fenólicos do resíduo. Diferentes temperaturas de extração (30, 40 e 50 °C) foram avaliadas, mantendo-se constante a razão amostra/solvente em 1:10 (g mL⁻¹) e o tempo de extração em 20 min (condição determinada durante os experimentos de cinética de extração dos compostos fenólicos descritos na seção 3.3.2). Subsequentemente, os extratos resultantes foram submetidos a filtração a vácuo utilizando papel filtro qualitativo. Em seguida, os filtrados foram coletados e submetidos à análise de CFT, como descrito na seção 3.2.2.3.1.

Uma vez identificada a temperatura que proporcionou a máxima recuperação de compostos fenólicos, procedeu-se à variação da razão entre sólido e solvente, mantendo constantes a temperatura e o tempo de extração em 20 min. Diversas razões (1:5, 1:10, 1:20 e 1:30) foram submetidas a investigação. Os extratos resultantes passaram por idêntico processo de filtração a vácuo e foram submetidos às análises de CFT. A razão que conduziu à mais elevada concentração de compostos fenólicos foi eleita para prosseguimento dos experimentos.

O extrato selecionado foi então submetido a análises de CFT e atividade antioxidante, conforme explicitado na seção 3.2.2.3. A FIGURA 11 apresenta um resumo da metodologia aplicada nos experimentos de extração.

FIGURA 11 – ESQUEMA DA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS A PARTIR DO RESÍDUO DE UVA/IA



FONTE: A autora (2024). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: FQ275DSRQX.

3.4 ENSAIO DE CITOTOXICIDADE

O ensaio de citotoxicidade foi conduzido no Laboratório de Imunologia Clínica, pertencente ao Departamento de Análises Clínicas, integrante do Setor de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Paraná.

3.4.1 Linhas e culturas celulares

Células de fibroblastos humanos HEK293 foram gentilmente fornecidas pelo Dr. Attilio Di Pietro (Institute for the Biology and Chemistry of Proteins (IBCP), Lyon, França). As células de câncer de mama humano MCF-7 foram obtidas por cortesia do Dr. Suresh Ambudkar (National Institutes of Health (NIH), Bethesda, EUA). As células foram cultivadas em frascos de cultivo celular de 25 cm², com tampas equipadas com filtros para permitir a troca gasosa durante a incubação. Ambas as linhagens celulares foram mantidas em meio de Eagle modificado por Dulbecco (DMEM), sendo a concentração de glicose alta para as células HEK293 e baixa para as células MCF-7. O meio foi suplementado com 10% de soro fetal bovino (FBS) e 1% de penicilina/estreptomicina, mantido a 37 °C e 5% de CO₂. A umidade foi controlada por um leito d'água com água Milli-Q ultrapura, localizado abaixo da última prateleira da incubadora (CCL-170B-8, Esco, Singapura).

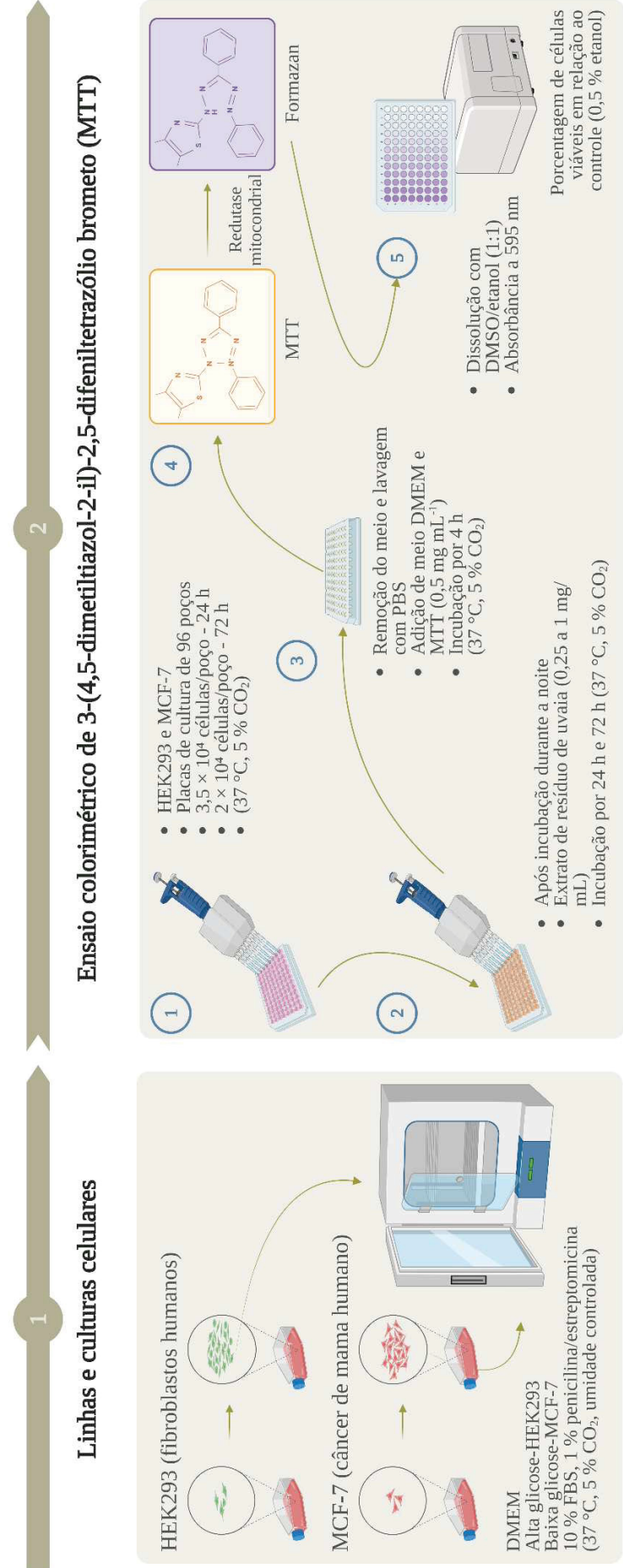
3.4.2 Ensaio de citotoxicidade

A viabilidade celular foi avaliada com um ensaio colorimétrico de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazólio brometo (MTT) com pequenas alterações (MOSMANN, 1983; SHENOY et al., 2017). As células HEK293 e MCF-7 foram plaqueadas em placas de cultura de 96 poços na densidade de $3,5 \times 10^4$ células/poço para o tratamento de 24 h, e na densidade de 2×10^4 células/poço para o tratamento de 72 h. Importante ressaltar que estas densidades foram determinadas previamente através de curvas de crescimento, assegurando que a concentração celular no dia da análise fosse adequada para alcançar a confluência desejada.

Após incubação por 24 h as células foram tratadas com concentrações crescentes de extrato de uvaia (0,25 a 1 mg ml⁻¹) por 24 e 72 h a 37 °C sob 5% de CO₂. Após o tratamento, o meio foi removido por pipetagem e as células foram lavadas

com solução salina tamponada com fosfato (PBS). Meio DMEM sem extrato foi adicionado às células, seguido por 20 μL de uma solução de MTT a $0,5 \text{ mg mL}^{-1}$ e incubação por 4 h a 37°C sob 5% de CO_2 . Os cristais de formazan foram dissolvidos com uma solução de 100 μL de dimetilsulfóxido (DMSO)/etanol (1:1) e a absorbância foi medida a 595 nm usando um leitor de microplacas (iMark™, Bio-Rad, Hercules, Califórnia, EUA). Os resultados foram expressos como porcentagem de células viáveis em relação às células controle (0,5% etanol (v/v), tomado como 100%). Na FIGURA 12 está apresentado um resumo da metodologia aplicada nos experimentos de citotoxicidade.

FIGURA 12 – ESQUEMA DA AVALIAÇÃO DA CITOTOXICIDADE DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA EM CÉLULAS HEK293 E MCF-7



FONTE: A autora (2024). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: AT270HH32W.

3.5 MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA

3.5.1 Produção das micropartículas

Após a obtenção do extrato de resíduo de uvaia, visando à maximização da concentração de compostos fenólicos, procedeu-se à remoção do etanol através de rotaevaporação a 50 °C e pressão de aproximadamente 160 mmHg, utilizando um evaporador rotativo a vácuo (MA120/THV, Marconi, Piracicaba, São Paulo, Brasil). A microencapsulação do extrato concentrado foi realizada utilizando maltodextrina, goma arábica e/ou inulina como agentes encapsulantes, conforme delineado nas proporções estabelecidas na TABELA 7. A quantidade de agentes encapsulantes empregada foi determinada com base em estudos anteriores relatados na literatura científica (BALDIN et al., 2018, 2016). Os agentes encapsulantes foram dissolvidos diretamente no extrato (25% em massa/volume) e homogeneizados utilizando um dispersor (modelo PT 3100D, Kinematica, Malvern, Suíça) a 6500 rpm por 10 min. As formulações resultantes foram então submetidas ao processo de microencapsulação por liofilização.

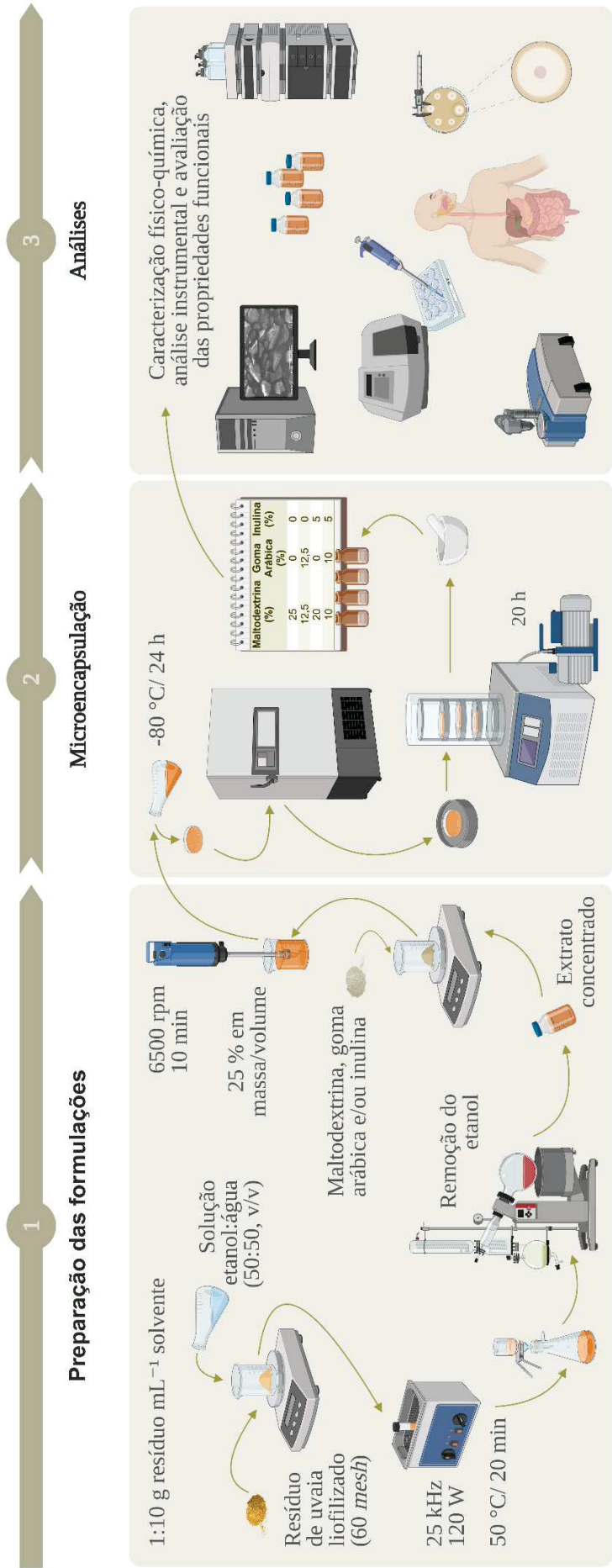
TABELA 7 – COMPOSIÇÃO DAS FORMULAÇÕES PARA ESTUDOS DE MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA (% EM MASSA DOS MATERIAIS ENCAPSULANTES EM RELAÇÃO AO VOLUME DO EXTRATO)

Formulação	Maltodextrina (%)	Goma Arábica (%)	Inulina (%)
1	25	0	0
2	12,5	12,5	0
3	20	0	5
4	10	10	5

A microencapsulação por liofilização seguiu o método delineado por Laureanti et al. (2023), com adaptações específicas. As preparações contendo extrato e material de revestimento foram distribuídas em placas de Petri, previamente cobertas com filme parafinado, e congeladas a -80 °C por 24 h em um congelador de ultrabaixa temperatura (U570-86, New Brunswick Scientific, Saint Albans, Inglaterra). Subsequentemente, essas amostras foram liofilizadas em um liofilizador horizontal de bancada (L101, Liobras, São Carlos, São Paulo, Brasil), com a unidade condensadora operando a -53 °C, por um período de 20 h. Após a liofilização, as amostras foram trituradas utilizando almofariz e pistilo. Posteriormente, foram acondicionadas em frascos de vidro âmbar para subsequente caracterização físico-química, análise

instrumental e avaliação das propriedades funcionais das micropartículas. Na FIGURA 13 está apresentado um resumo da metodologia aplicada nos experimentos de microencapsulação.

FIGURA 13 – ESQUEMA DA MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA



FONTE: A autora (2024). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: HE277XHZTM.

3.5.2 Perfil de compostos fenólicos do extrato de resíduo de uvaia concentrado

O extrato de resíduo de uvaia concentrado foi submetido à análise por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) com o objetivo de separar, identificar e quantificar os compostos fenólicos. A extração dos compostos fenólicos das micropartículas seguiu o protocolo descrito por Faria et al. (2020), com algumas adaptações. Em resumo, 20 mg de cada amostra foram dispersos em 2 mL de uma solução contendo metanol, água e ácido acético na proporção de 50:42:8 (v/v/v) e agitados por 1 minuto em um agitador tipo vórtex (AP 56, Phoenix, Araraquara, São Paulo, Brasil). Posteriormente, as amostras foram submetidas a um banho ultrassônico por 10 min (Q3.0 25A, Eco-sonics Indaiatuba, São Paulo, Brasil) e filtradas através de uma membrana de nylon Acrodisc de 0,45 μm (Merck Life Science).

As análises foram realizadas em um sistema CLAE Agilent 1200 Series (Santa Clara, Califórnia, EUA) equipado com bomba quaternária (G1311B), autoinjeter (G1329B), compartimento de colunas (G1316A) e detector de arranjo de diodos (DAD, G4212B). A separação cromatográfica foi conduzida em uma coluna Acclaim 120 C18 (250 mm x 4,6 mm x 5 μm) sob fluxo constante de 1,0 mL min⁻¹ e temperatura controlada a 35°C. A fase móvel consistiu em uma solução de ácido fosfórico ajustada a pH 2,15 (fase A) e acetonitrila (fase B). O volume de injeção foi de 10 μL .

Dois métodos de gradiente diferentes foram implementados para otimizar a separação dos compostos.

Método 1: Gradiente: 0 min 2% B; 30 min 8% B; 50 min 30% B; 52 min 2% B; 62 min 2% B.

Deteção: ácido gálico (271 nm, tempo de retenção: 10,152 min), ácido vanílico (256/292 nm, 35,4055 min), ácido clorogênico (326 nm, 37,280 min), ácido cafeico (323 nm, 37,797 min), ácido siríngico (274 nm, 39,551 min), ácido cumárico (309 nm, 43,656 min), ácido ferúlico (322 nm, 46,239 min).

Método 2: Gradiente: 0 min 2% B; 50 min 25% B; 70 min 35% B; 72 min 2% B; 78 min 2% B.

Deteção: catequina (280 nm, tempo de retenção: 23,608 min), procianidina (280 nm, 27,186 min), cianidina (516 nm, 28,427 min), rutina (280 nm, 40,548 min), isoquercetina (280 nm, 41,912 min), quercetina (280 nm, 60,638 min).

A quantificação foi realizada utilizando curvas analíticas construídas a partir dos padrões correspondentes.

3.5.3 Caracterização físico-química, análise instrumental e avaliação das propriedades funcionais das micropartículas

3.5.3.1.1 Morfologia de superfície

A avaliação da morfologia superficial das micropartículas foi conduzida conforme a metodologia delineada na seção 3.2.2.2.

3.5.3.1.2 Umidade e atividade de água

A quantificação do conteúdo de umidade (%) das micropartículas foi conduzida empregando o método gravimétrico, no qual uma porção de amostra (0,5 g) foi submetida à secagem em estufa (410/3NDR, Nova Ética, Vargem Grande do Sul, São Paulo, Brasil) a uma temperatura de 105 °C por um período de 24 h. Após a secagem, a massa da amostra foi medida novamente, e a diferença de massa foi utilizada para calcular a umidade, conforme as diretrizes estabelecidas pelo IAL (IAL, 2008). A determinação da atividade de água (a_w) das micropartículas foi realizada à temperatura de 25 °C, utilizando um analisador de atividade de água (Aqualab série 3, Decagon, Pullman, EUA).

3.5.3.1.3 Cor instrumental

A avaliação da cor das micropartículas, das micropartículas reconstituídas e do extrato de resíduo de uvaia concentrado foi realizada utilizando um colorímetro portátil (Chroma Meter CR400, Konica Minolta, Tóquio, Japão). As amostras de micropartículas reconstituídas foram preparadas dissolvendo-se 0,5 g de micropartículas em 2 mL de água destilada, seguido de agitação em agitador de tubos (AP 56, Phoenix, Araraquara, São Paulo, Brasil).

O sistema de cores CIE $L^*a^*b^*$ foi empregado, utilizando iluminante D65 e ângulo de observação de 10°. As coordenadas L^* , a^* e b^* foram obtidas diretamente pelo equipamento, enquanto os parâmetros de croma (C^*) e ângulo de matiz (h°)

foram determinados a partir dos valores de a^* e b^* , utilizando as equações (1) e (2) (SCHANDA, 2007).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

$$h^\circ = \arctan \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (2)$$

O ângulo de matiz (h°) descreve a tonalidade da cor, enquanto o parâmetro de croma (C^*) representa a saturação da cor (SCHANDA, 2007).

3.5.3.1.4 Densidade aparente

A densidade aparente das micropartículas foi avaliada seguindo o protocolo delineado por Barbosa-Cánovas et al. (2005). Neste procedimento, 2 g da amostra foram inseridos em uma proveta graduada de 10 mL, e o volume ocupado pela amostra foi registrado. A densidade aparente foi então calculada pela razão entre a massa do pó e o volume ocupado na proveta, como descrito na Equação (3).

$$d_{aparente} (g \text{ mL}^{-1}) = \frac{m_{micropartículas} (g)}{V_{ocupado} (mL)} \quad (3)$$

3.5.3.1.5 Estabilidade térmica

A estabilidade térmica das micropartículas foi avaliada por meio de análise termogravimétrica (TGA). As curvas termogravimétricas foram obtidas utilizando um analisador térmico (TGA 4000, PerkinElmer, Waltham, Massachusetts, EUA), seguindo o protocolo estabelecido por Laureanti et al. (2023). O ensaio foi conduzido sob atmosfera inerte de nitrogênio, com fluxo controlado de 50 mL min⁻¹, na qual as amostras foram aquecidas de 30 °C a 600 °C a uma taxa de aquecimento constante de 10 °C min⁻¹.

3.5.3.1.6 Identificação de grupos funcionais e estrutura química

A identificação dos grupos químicos e ligações presentes nas amostras foi realizada por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR). Amostras de micropartículas, materiais encapsulantes ou extrato de resíduo de uvaia liofilizado foram preparadas através da moagem com brometo de potássio (KBr) grau espectroscópico previamente seco em estufa a 110 °C. As misturas foram preparadas na proporção de 1,6 mg de amostra para 100 mg de KBr. Após a pesagem, as misturas foram pulverizadas e prensadas em moldes de aço inoxidável submetidos a 10 toneladas-força por 60 segundos, resultando em pastilhas translúcidas com 13 mm de diâmetro.

Os espectros vibracionais de absorção no infravermelho foram adquiridos utilizando um espectrômetro (Alpha II, BRUKER, Billerica, Massachusetts, EUA), no modo de absorbância, abrangendo a faixa espectral de 4000 a 600 cm^{-1} com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras. Os espectros adquiridos foram submetidos aos tratamentos de correção da linha de base e decomposição das bandas.

A decomposição matemática dos espectros vibracionais de infravermelho foi realizada utilizando um algoritmo que minimiza sobreposições entre bandas largas, revelando bandas em frequências próximas antes sobrepostas. A sobreposição é uma característica intrínseca dos espectros das amostras analisadas e não pode ser resolvida por meio de ajustes nos parâmetros de análise ou no preparo da amostra. O algoritmo utilizado para o processamento matemático foi a FFT inversa (Transformada Rápida de Fourier), com ajuste de distribuição de banda lorentziana, empregando fator de deconvolução de 23 e fator de redução de ruído espectral de 0,22, utilizando o *software* OPUS 8.5 da Bruker Corporation.

3.5.4 Solubilidade

A solubilidade das micropartículas foi determinada conforme o procedimento delineado por Cano-Chauca et al. (2005), com algumas modificações. Em resumo, uma quantidade de 0,1 g de micropartículas foi homogeneizada em 10 mL de água destilada, agitada por 5 min (AP 56, Phoenix, Araraquara, São Paulo, Brasil) e posteriormente centrifugada a 1370 x g por 5 min (Z 383 K Hermle, Wehingen, Baden-Württemberg, Alemanha). O sobrenadante resultante (2,5 mL) foi submetido à

secagem em estufa (410/3NDR, Nova Ética, Vargem Grande do Sul, São Paulo, Brasil) a 105 °C por 5 h. A solubilidade foi então calculada conforme a Equação (4).

$$\text{Solubilidade (\%)} = \frac{m_{\text{seca sobrenadante}}}{m_{\text{seca alíquota retirada}}} \times 100 \quad (4)$$

3.5.5 Higroscopicidade

A análise da higroscopicidade das amostras foi conduzida em consonância com a metodologia delineada por Tonon, Brabet e Hubinger (2008). Amostras de 1 g foram dispostas em dessecadores contendo soluções saturadas de NaCl, proporcionando uma umidade relativa de 75% a uma temperatura de 25 °C ± 1 °C ao longo de um período de sete dias. Após este intervalo, procedeu-se à aferição da massa das amostras, sendo a higroscopicidade quantificada em gramas de umidade absorvida por 100 g de amostra, conforme definido pela Equação (5).

$$\text{Higroscopicidade (g 100 g}^{-1}\text{)} = \frac{m_{\text{micropartículas inicial}} - m_{\text{micropartículas (7 dias)}}}{m_{\text{micropartículas inicial}}} \times 100 \quad (5)$$

3.5.6 Eficiência de encapsulação

A avaliação da eficiência de encapsulação [EE (%)] dos compostos fenólicos no interior das micropartículas foi conduzida seguindo o protocolo descrito por Silva et al. (2024). A EE foi definida como a relação entre a concentração de compostos fenólicos não encapsulados, localizados na superfície das micropartículas, e o total de compostos fenólicos microencapsulados, conforme expresso pela Equação (6).

$$EE (\%) = 1 - \frac{\text{Conteúdo fenólico}_{\text{superficial}}}{\text{Conteúdo fenólico total}} \times 100 \quad (6)$$

Para a extração do conteúdo fenólico presente na superfície das micropartículas, 100 mg destas foram homogeneizadas com 1 ml de uma solução de

etanol e metanol (1:1 v/v), submetidas à agitação por 1 minuto em vórtex (AP 56, Phoenix, Araraquara, São Paulo, Brasil) e filtradas utilizando membranas de nylon Acrodisc de 0,45 µm (Merck Life Science). O conteúdo fenólico total foi obtido dissolvendo 100 mg de micropartículas em 1 ml de uma solução de etanol, ácido acético e água (50:8:42 v/v/v). Após agitação por 5 min, a solução foi centrifugada a 3500 x g por 10 min (5415 C, Eppendorf, Hamburgo, Alemanha), e o sobrenadante foi filtrado utilizando membranas de nylon Acrodisc de 0,45 µm. A concentração dos compostos fenólicos foi determinada conforme o protocolo descrito na seção 3.2.2.3.1, expressa em mg EAG 100 g⁻¹ de micropartículas (BS).

3.5.7 Atividade antimicrobiana

A atividade antimicrobiana do extrato de resíduo de uvaia e das micropartículas foi avaliada utilizando o método de disco-difusão para teste de sensibilidade aos antimicrobianos (BRCast-EUCast, 2024), com algumas modificações. Foram empregadas cepas bacterianas Gram-positiva (*Staphylococcus aureus*) e Gram-negativa (*Salmonella Typhimurium*), obtidas da coleção de culturas do Laboratório de Engenharia Biológica da Universidade Federal de Santa Catarina (LIEB). A escolha dessas cepas foi baseada em sua relevância para a indústria alimentícia.

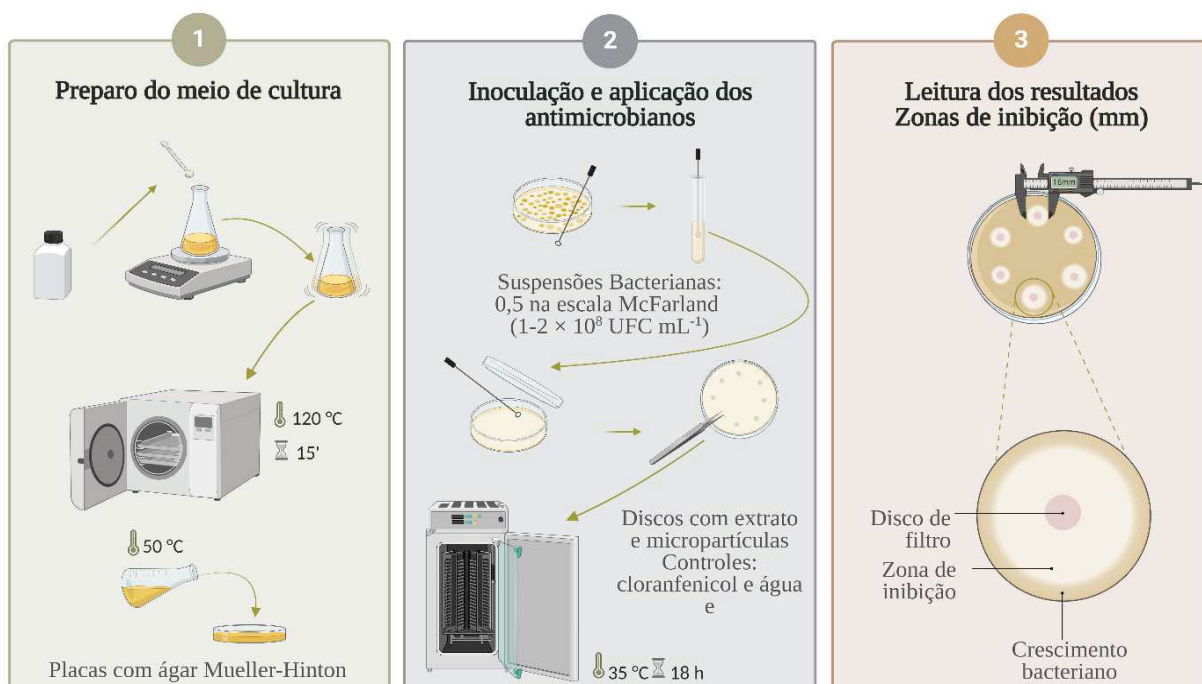
As cepas bacterianas foram reativadas em caldo Brain Heart Infusion (BHI) a 37 °C por 24 h em incubadora com agitação orbital a 150 rpm (TE-4200, Piracicaba, São Paulo, Brasil). Em seguida, as cepas foram cultivadas em placas de Mueller-Hinton a 35 °C por 18 h em incubadora (TE-371, Piracicaba, São Paulo, Brasil). As suspensões bacterianas foram preparadas a partir da suspensão direta das colônias em solução salina estéril (0,85%). A absorbância das suspensões foi ajustada para 0,08-0,13 a 625 nm utilizando um espectrofotômetro (SP-220, Biospectro, São Paulo, São Paulo, Brasil), correspondendo a uma densidade óptica de 0,5 na escala de McFarland, equivalente a $1-2 \times 10^8$ UFC mL⁻¹.

Discos de papel foram cortados de uma folha de filtro utilizando um perfurador de dois furos e, em seguida, autoclavados. Os discos foram impregnados com 20 µL do extrato de resíduo de uvaia rotaevaporado ou 20 µL das suspensões de micropartículas, sendo então secos em capela de fluxo laminar por 30 min à temperatura ambiente (MAVANZA; OMWENGA; NGUGI, 2023). As suspensões de

micropartículas foram preparadas pela dissolução de 0,5 g de micropartículas em 2 mL de água destilada estéril. Discos impregnados com 30 µg de cloridrato de cloranfenicol foram utilizados como controle positivo, enquanto discos contendo 20 µL de água destilada serviram como controle negativo.

Placas de Petri contendo ágar Mueller-Hinton, preparadas conforme as especificações do fabricante, foram inoculadas com as suspensões bacterianas usando um *swab* estéril. Os discos impregnados foram então colocados sobre a superfície do ágar. As placas foram incubadas a 35 °C por 18 h em posição invertida (TE-371, Piracicaba, São Paulo, Brasil). Após o período de incubação, os diâmetros dos halos de inibição ao redor dos discos foram medidos utilizando uma régua milimetrada. A atividade antimicrobiana foi expressa como o diâmetro médio dos halos de inibição (em milímetros), com todas as determinações realizadas em triplicata. Na FIGURA 14 está apresentado um resumo esquemático da metodologia utilizada.

FIGURA 14 – METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIMICROBIANA *IN VITRO* DE MICROPARTÍCULAS E EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA



FONTE: A autora (2024). Criado com BioRender.com. Licença de publicação: SL277X3KEP.

3.5.8 Estabilidade de compostos fenólicos durante a digestão gastrointestinal simulada *in vitro*

A simulação da digestão gastrointestinal do extrato de resíduo de uvaia e das micropartículas foi conduzida em conformidade com o protocolo INFOGEST, delineado por Brodkorb et al. (2019), com adaptações. Inicialmente, soluções eletrolíticas representativas dos fluidos salivar (FSS), gástrico (FGS) e intestinal (FIS) foram preparadas conforme descrito na literatura. Os movimentos peristálticos foram simulados em uma incubadora *shaker* de bancada (430-RDBP, Nova Ética, Vargem Grande do Sul, São Paulo, Brasil) a $37\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 120 rpm.

Na fase oral, a amostra foi diluída na proporção de 1:1 (m/m) em FSS (pH 7,0) e incubada por 2 min. Em seguida, FGS contendo pepsina suína (2000 U mL^{-1}) foi adicionado na mesma proporção à mistura oral, a qual foi então incubada por 2 h a pH 3,0. Posteriormente, o bolo gástrico foi misturado na proporção de 1:1 (m/m) com FIS contendo sais biliares (concentração final de 10 mM) e pancreatina ($100\text{ U de tripsina mL}^{-1}$), e incubado a pH 7,0 por mais 2 h. Após cada etapa, as amostras digeridas foram mantidas em banho de gelo por 10 min, centrifugadas a $1370 \times g$ por 10 min (Z 383 K Hermle, Wehingen, Baden-Württemberg, Alemanha), e os sobrenadantes foram armazenados a $-18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ até as análises subsequentes. O efeito da digestão foi avaliado por meio de ensaios de atividade antioxidante e CFT, conforme seção 3.2.2.3. Para controlar interferências dos reagentes, um branco composto por água foi submetido ao mesmo procedimento.

Destaca-se que a biodisponibilidade de um composto, sua habilidade de ser absorvido e disponibilizado em seu sítio de ação, é dependente da sua prévia bioacessibilidade. Este conceito se refere à liberação do composto da matriz alimentar no trato gastrointestinal, tornando-o acessível para absorção (SANTOS-BUELGA et al., 2019). A quantidade de moléculas bioacessíveis está diretamente associada à concentração dos compostos fenólicos liberados, sendo mais proeminente em concentrações mais elevadas. O cálculo da bioacessibilidade (%) foi realizado pela Equação (7) (SILVA et al., 2024).

$$\text{Bioacessibilidade (\%)} = \frac{\text{Conteúdo fenólico total}_{\text{após fase específica da digestão}}}{\text{Conteúdo fenólico total}_{\text{antes da digestão}}} \quad (7)$$

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

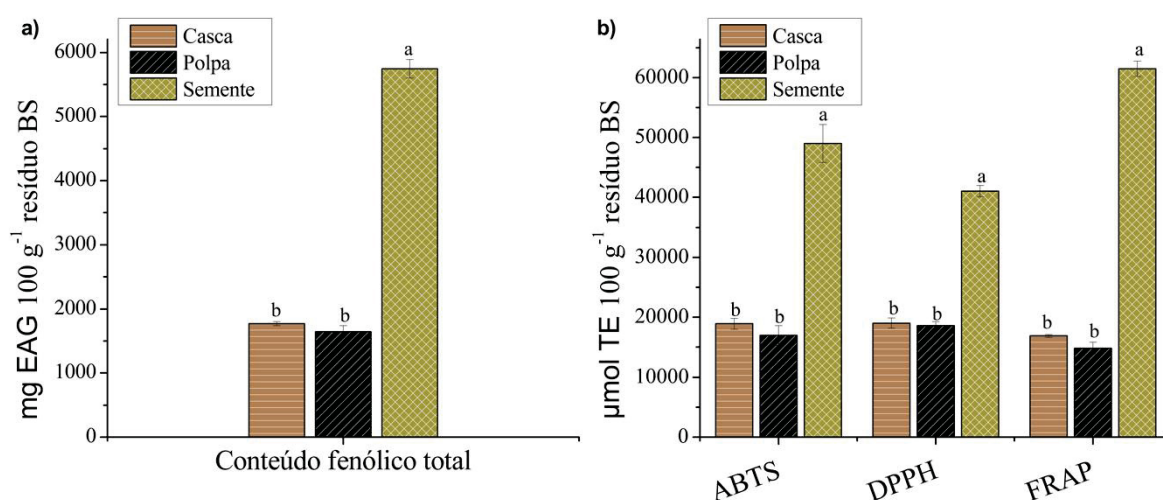
Os resultados das análises foram submetidos a uma análise de variância unidirecional (ANOVA *one-way*) seguida pelo teste de Tukey, com um nível de significância de $p < 0,05$, empregando o *software* estatístico TIBCO Statistica® versão 13.5.0. As curvas foram plotadas utilizando o *software* OriginPro versão 8.5. Os resultados foram apresentados como média $\pm$ desvio padrão (n=3).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 QUANTIFICAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS E AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE EM DIFERENTES FRAÇÕES DA UVAIA

Na FIGURA 15 são apresentados os resultados referentes à concentração de compostos fenólicos e à atividade antioxidante nas diferentes partes da uvaia. Esses dados são fundamentais para compreender a distribuição de compostos bioativos da fruta com potencial impacto na saúde humana. Observa-se que tanto a casca quanto a polpa da uvaia apresentaram conteúdos significativos de compostos fenólicos, registrando valores de 1769 ± 32 mg EAG 100 g^{-1} BS e 1644 ± 93 mg EAG 100 g^{-1} BS, respectivamente. A semente, por sua vez, apresentou uma concentração substancialmente mais elevada, atingindo 57456 ± 144 mg EAG 100 g^{-1} BS. Estes achados corroboram descobertas anteriores que destacam a semente como uma fonte mais abundante de compostos fenólicos em comparação com a fração comestível da uvaia, abrangendo ácidos fenólicos, flavonóis, flavan-3-óis monoméricos e flavonas (FARIAS et al., 2020a). Tais compostos têm sido associados a propriedades antioxidantes e potenciais benefícios à saúde (MARK et al., 2019).

FIGURA 15 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS (a) E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE (b) EM CASCA, POLPA E SEMENTE DE UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS)



BS – Valores expressos em base seca. EAG – Equivalentes de ácido gálico. TEAC – Atividade antioxidante equivalente ao Trolox. Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma linha, não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra, em um mesmo método de avaliação da atividade antioxidante, não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Apesar das concentrações expressivas de fenólicos totais obtidas neste trabalho, é importante salientar que essas foram inferiores às obtidas em estudos anteriores. Por exemplo, para a polpa liofilizada, concentrações entre 1930 mg EAG 100 g⁻¹ BS a 3028,58 mg EAG 100 g⁻¹ BS foram reportadas (DACOREGGIO et al., 2023; FREITAS et al., 2019; RUFINO et al., 2010). Adicionalmente, tanto na fração comestível (casca e polpa) quanto nas sementes, o conteúdo fenólico total revelou-se inferior às quantidades reportadas por Farias et al. (2020b) para essa espécie, as quais foram de 4936 e 23744 mg EAG 100 g⁻¹ BS, respectivamente. Essas discrepâncias podem ser atribuídas à variabilidade genética das amostras e às diferenças nas condições ambientais e climáticas das regiões onde os frutos foram coletados (FARIAS et al., 2020a). Além disso, a diferença nos valores também pode ser atribuída a variações nos métodos de extração e análise, incluindo o tipo de solvente utilizado, o tempo de extração, e outras condições experimentais.

Quanto à atividade antioxidante, avaliada pelos métodos ABTS^{•+}, DPPH[•] e FRAP, os resultados corroboram a tendência observada no conteúdo fenólico total. A semente de uvaia destaca-se novamente, apresentando as maiores atividades antioxidantes em todos os métodos. Os valores expressos em $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$ para ABTS^{•+}, DPPH[•] e FRAP foram, respectivamente, 18916, 19027 e 16897 para a casca, 16952, 18597 e 14852 para a polpa, e 48977, 41040 e 61466 para a semente. Este padrão de comportamento está em acordo com os reportados na literatura científica (DA SILVA et al., 2019; FARIAS et al., 2020a; TAVER et al., 2022), destacando a relação entre o conteúdo fenólico e a atividade antioxidante. O valor encontrado para a atividade antioxidante da semente de uvaia pelo método ABTS neste estudo foi aproximado ao anteriormente relatado por Farias et al. (2020b) (42786 $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$), enquanto o valor obtido para o método DPPH foi superior ao descrito por este autor (23500 $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$). Não foram encontradas informações acerca do método FRAP para sementes. As discrepâncias observadas entre os estudos podem ser atribuídas aos mesmos fatores discutidos para o conteúdo fenólico, incluindo heterogeneidade nos métodos de extração, variações nas condições de ensaio e características intrínsecas das amostras, além do ambiente em que estão inseridas. Além disso, houve diferenças nos valores obtidos entre os métodos de avaliação da atividade antioxidante neste estudo (ABTS^{•+}, DPPH[•] e FRAP). Tais discrepâncias evidenciam os distintos mecanismos de reação, a natureza específica do radical livre alvo e os compostos químicos envolvidos

em cada uma dessas análises espectrofotométricas. No entanto, cada método destaca aspectos específicos da atividade antioxidante e a convergência desses métodos contribui para uma compreensão abrangente da atividade antioxidante da uvaia.

Apesar da ausência de concordância absoluta nos valores de atividade antioxidante dentro de cada fração analisada, a consistência nas tendências observadas entre as frações fortalece a validade dos resultados obtidos. Essas observações destacam a importância da semente de uvaia como uma significativa fonte de compostos bioativos, ressaltando a urgência em explorar potenciais aplicações dessa fração nos setores alimentícios e farmacêuticos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E FÍSICO-QUÍMICA DOS RESÍDUOS DE UVAIA

4.2.1 Composição química e análises físicas e físico-químicas

Os resultados das análises realizadas tanto no fruto inteiro quanto nos diferentes resíduos de uvaia (*in natura*, secos em estufa e liofilizados), considerando variações na granulometria (14 *mesh* e 60 *mesh*), foram condensados na TABELA 8.

TABELA 8 – COMPOSIÇÃO CENTESIMAL E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS) E SEUS RESÍDUOS (CASCA E SEMENTES)

ANÁLISE DE FRUTOS (CARAMBOLAS) E SEUS RESÍDUOS (CASCAS E SEMENTES)						
Análise	Fruto inteiro	Resíduo <i>in natura</i>	Amostra		Resíduo liofilizado	
			Resíduo seco em estufa		14 mesh	60 mesh
			14 mesh	60 mesh		
Umidade (% BU)		72,2 ± 0,1	8,2 ± 0,5	7,3 ± 0,5	6,03 ± 0,05	7,52 ± 0,06
Sólidos totais (% BU)		27,8 ± 0,1				
Cinzas (% BU)		0,52 ± 0,01				
Proteínas (% BU)		2,71 ± 0,09				
Lipídios (% BU)		0,45 ± 0,00				
Carboidratos (% BU)		24,16				
Sólidos solúveis (° Brix BU)		6,00 ± 0,00				
Acidez titulável (g AC 100 g ⁻¹ BU)		0,50 ± 0,01				
pH		3,76 ± 0,03				
Cor instrumental	L*=59,6 ± 0,5 a*=10,4 ± 0,8 b*=55 ± 1					

BU – Valores expressos em base úmida. AC – Ácido cítrico. CV – Coeficiente de variação (%).

A avaliação da umidade desempenha papel fundamental na compreensão da estabilidade e durabilidade das diversas formas da matéria-prima. A uvaia, caracterizada por uma elevada porcentagem de água em sua composição, exibe alta perecibilidade (FREITAS et al., 2019; SGANZERLA et al., 2021). Para aumentar a viabilidade da uvaia como recurso, é essencial investigar métodos adequados de processamento. Mesmo após o despolpamento, foi constatada uma umidade elevada no resíduo (72,2 ± 0,1%), em consonância com estudos anteriores que destacam a elevada umidade na semente de uvaia, a principal fração do resíduo. Farias et al. (2020b) registraram uma umidade de 88,54% para a semente. Este valor foi ligeiramente inferior ao observado na fração comestível (91,75%), a qual também compõe o resíduo na forma de casca e remanescentes de polpa. Entretanto, os processos de secagem e liofilização aplicados neste estudo ao resíduo *in natura* resultaram em uma significativa redução do conteúdo de água, variando entre 6,03 e 8,2%. Embora a redução da umidade contribua para a estabilidade microbiológica, a atividade de água deve ser considerada para uma avaliação completa. No entanto, o resíduo desidratado de uvaia é um ingrediente potencialmente estável que pode ser

investigado para sua inclusão em diversas formulações de produtos, como na panificação e confeitaria, conforme sugerido por Ramos et al. (2017).

A avaliação da composição química demonstrou que o resíduo de uvaia é uma fonte rica em macronutrientes. As concentrações médias de cinzas atingiram $0,52 \pm 0,01\%$, proteínas totalizaram $2,71 \pm 0,09\%$, lipídios perfizeram $0,45 \pm 0,00\%$, e os carboidratos alcançaram $24,16 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ de matéria fresca. A composição identificada assemelha-se ao perfil observado por Rodrigues et al. (2021) em estudo análogo de resíduos de uvaia (casca e sementes) provenientes de outra região. Nesse estudo, os conteúdos encontrados foram 76,0% de umidade, 0,31% de cinzas, 2,7% de proteínas, 0,35% de lipídios e 21,0 g de carboidratos por 100 g de matéria fresca. No entanto, divergências mais substanciais emergiram na análise de resíduos conduzida por Ramos et al. (2017), evidenciando umidade de 89,2%, 2,64% de proteínas, 0,36% de lipídios, 0,25% de cinzas, 4,7% de fibras e 2,8 g de carboidratos por 100 g de matéria fresca. Essas disparidades podem ser atribuídas a variáveis genéticas, estágios de maturação e condições edafoclimáticas, as quais induzem flutuações na composição química das frutas e, conseqüentemente, conduzem a variações regionais (FARIAS et al., 2020a).

O conteúdo de sólidos solúveis totais (SST) identificado neste estudo, correspondente a 6° Brix BU, foi significativamente superior ao mencionado por Rodrigues et al. (2021), que indicaram $2,70 \pm 0,06$ °Brix para o resíduo de uvaia. Esta discrepância pode ser atribuída às diferenças intrínsecas entre diferentes plantas e seus respectivos estágios de maturação, uma vez que há uma tendência de correlação positiva entre a maturação avançada da uvaia e níveis mais elevados de sólidos solúveis totais (FREITAS et al., 2019). Vale ressaltar que os sólidos solúveis totais apresentam uma correlação direta com a doçura da fruta, sendo um dos principais parâmetros sensoriais empregados pelos consumidores para avaliar a qualidade de produtos derivados de frutas (DA SILVA et al., 2018a).

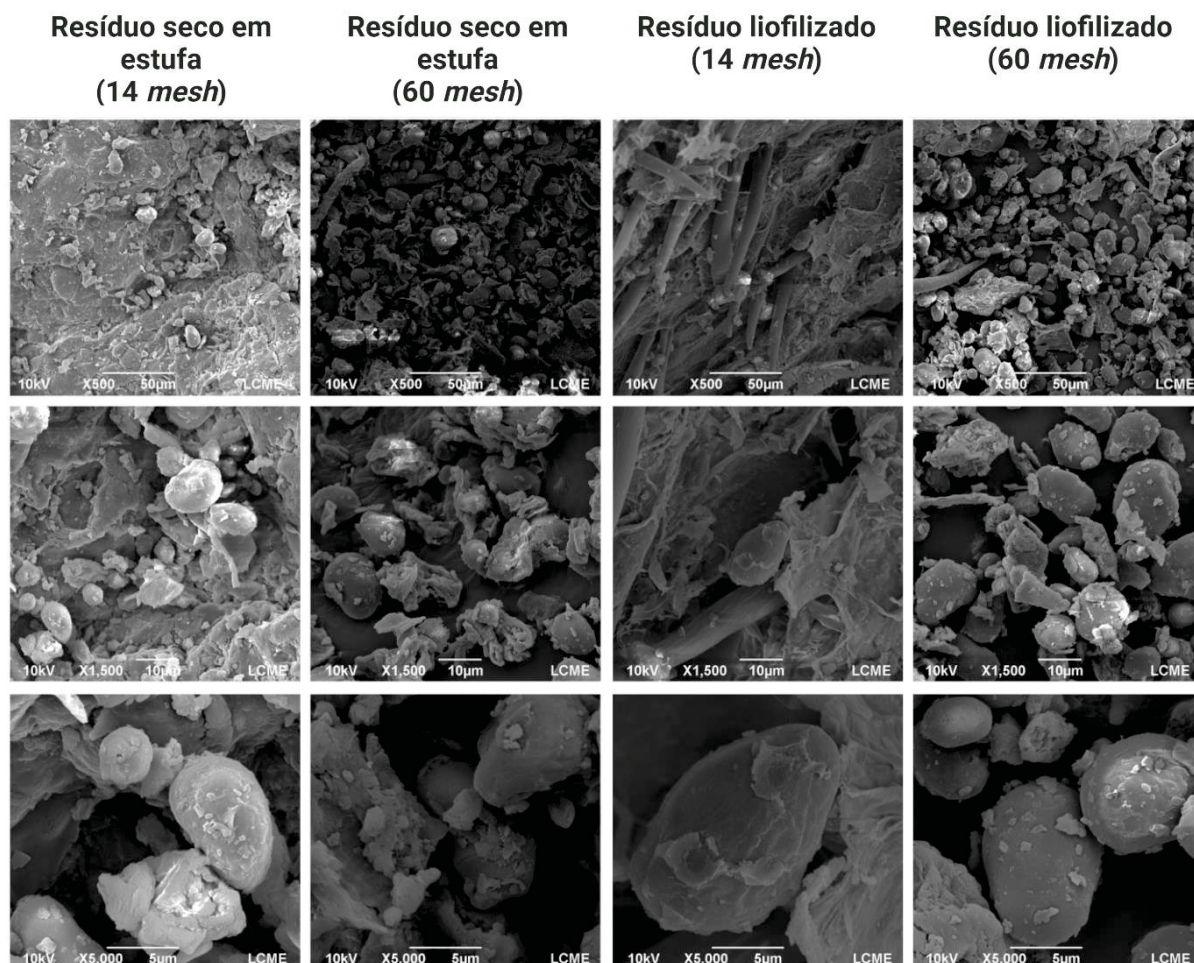
No que diz respeito aos parâmetros de acidez titulável ($0,50 \pm 0,01 \text{ g de ácido cítrico } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BU}$) e pH ($3,76 \pm 0,03$), estes indicaram que o resíduo da uvaia possui uma acidez moderada. Aferições desses parâmetros são cruciais na determinação da viabilidade de aplicações em produtos alimentícios. O valor encontrado para o pH foi ligeiramente inferior ao previamente relatado (pH = 3,93) por Rodrigues et al. (2021), sugerindo uma variabilidade potencial entre diferentes amostras.

Quanto à coloração da casca do fruto da uvaia, os valores de luminosidade (L) foram registrados em $59,6 \pm 0,5$, com uma inclinação ao matiz vermelho (a^*) de $10,4 \pm 0,8$ e uma inclinação ao amarelo (b^*) de 55 ± 1 . Estes resultados exibem disparidades em relação aos obtidos por Rodrigues et al. (2021), cujos parâmetros cromáticos do fruto revelaram um índice de luminosidade (L) de $58,8 \pm 0,7$, uma propensão ao matiz vermelho (a^*) de $2,8 \pm 0,7$ e uma inclinação para o matiz amarelo (b^*) de $39,0 \pm 0,6$. Tais discrepâncias eram esperadas, dado que os frutos da uvaia apresentam considerável variabilidade em termos de cor, abrangendo desde tons amarelos até laranjas (DA SILVA et al., 2018b). Além disso, o estágio de maturação influencia a coloração, com frutos maduros apresentando cores mais intensas devido ao aumento de compostos fenólicos e carotenoides, enquanto frutos menos maduros exibem características cromáticas e composição química distintas (FREITAS et al., 2019). A avaliação instrumental da cor é fundamental para as indústrias que buscam manter a atratividade visual de seus produtos, sendo intimamente associada à qualidade do fruto (SGANZERLA et al., 2021).

4.2.2 Caracterização morfológica

A análise morfológica do resíduo de uvaia é essencial para compreender suas propriedades estruturais, as quais desempenham um papel fundamental na extração de compostos bioativos. Na FIGURA 16 são apresentadas as micrografias eletrônicas de varredura do resíduo de uvaia seco em estufa e liofilizado, considerando variações na granulometria (14 e 60 *mesh*).

FIGURA 16 – MICROGRAFIAS DE SUPERFÍCIE DOS RESÍDUOS DE UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS) SECOS EM ESTUFA E LIOFILIZADOS



Fonte: A autora (2024).

O componente preponderante, identificado nas micrografias, é o amido, cuja presença é significativa nas sementes de uvaia, funcionando como reserva energética durante a germinação (FARIAS et al., 2020a). Os grânulos de amido observados exibem uma diversidade de formas e tamanhos, destacando-se pela irregularidade. Esta caracterização morfológica está em consonância com os achados de Guedes et al. (2021), os quais descreveram grânulos de amido de semente de uvaia como apresentando formas ovais, esféricas ou reniformes com variações dimensionais.

Ao analisar a micrografia dos resíduos obtidos através da malha de 14 *mesh*, observa-se uma predominância de partículas maiores e uma estrutura mais heterogênea, com a presença de aglomerados. Em contrapartida, a micrografia dos resíduos obtidos através da peneira de malha 60 *mesh* revelou uma estrutura mais

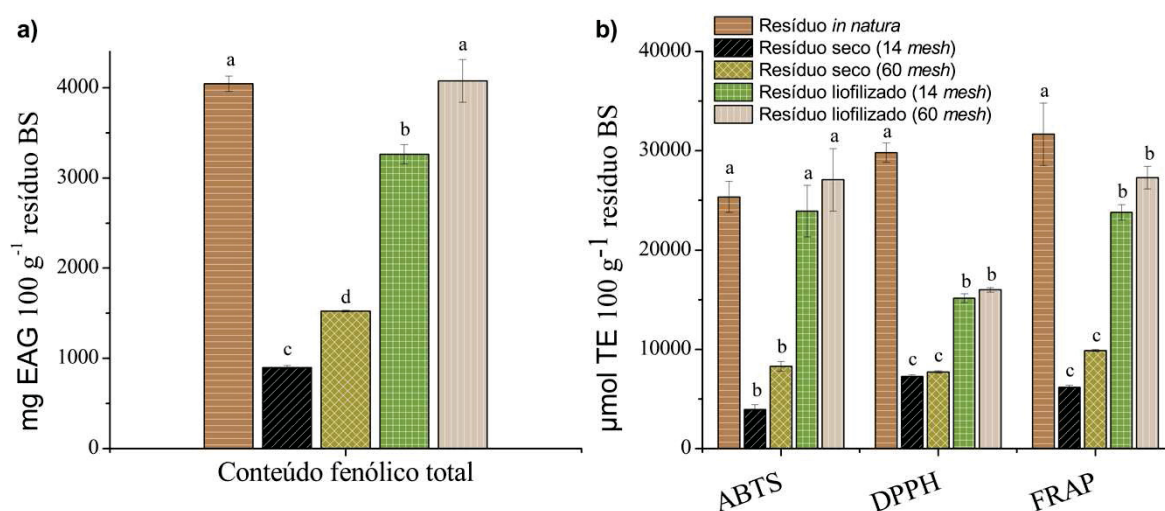
homogênea, caracterizada pela predominância de partículas menores e maior uniformidade granulométrica.

A FIGURA 16 mostra que o resíduo de uvaia seco em estufa apresenta uma estrutura mais fragmentada em comparação ao resíduo liofilizado. A secagem em estufa, embora eficaz na eliminação da umidade, pode resultar em um encolhimento da estrutura devido à aplicação prolongada de calor. Em contrapartida, a liofilização, enquanto método de secagem em baixas temperaturas, pode preservar a estrutura original, a natureza e a forma da matéria-prima (HUA; LIU; ZHANG, 2010), resultando em uma estrutura mais intacta com fibras visivelmente preservadas.

4.2.3 Concentração de compostos bioativos e atividade antioxidante

Na FIGURA 17 são apresentados os resultados referentes à concentração de compostos fenólicos e à atividade antioxidante em resíduos de uvaia nos estados *in natura*, secos em estufa e liofilizados, diferenciados pelas granulometrias de 14 e 60 mesh.

FIGURA 17 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS (a) E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE (b) EM RESÍDUOS DE UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS)



BS – Valores expressos em base seca. EAG – Equivalentes de ácido gálico. TEAC – Atividade antioxidante equivalente ao Trolox. Médias seguidas pela mesma letra, em uma mesma linha, não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra, em um mesmo método de avaliação da atividade antioxidante, não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

As observações revelaram variações estatisticamente significativas nas concentrações de compostos fenólicos entre as diferentes amostras. Os resíduos secos em estufa exibiram os menores conteúdos fenólicos totais, correspondendo a 900 mg EAG 100 g⁻¹ BS para a granulometria 14 *mesh* e 1523 mg EAG 100 g⁻¹ BS para 60 *mesh*. Em contraste, o resíduo liofilizado, com sua estrutura preservada, manifestou concentrações mais elevadas, com 3261 mg EAG 100 g⁻¹ BS para 14 *mesh* e 4075 mg EAG 100 g⁻¹ BS para 60 *mesh*.

Os resultados obtidos destacam a influência significativa do processamento (método de secagem) e da granulometria na extração de compostos fenólicos dos resíduos de uvaia. A granulometria emerge como fator determinante no processo de extração de compostos fenólicos. A ampliação da área de contato entre o material sólido e o líquido extrator, decorrente das pequenas dimensões das partículas, resulta em aumento considerável na velocidade de transferência de massa e, conseqüentemente, na eficiência da operação de extração. Adicionalmente, constata-se que o método de processamento exerce influência substancial na extração de compostos bioativos, sendo a forma liofilizada associada a um conteúdo fenólico total superior em comparação com o resíduo submetido à secagem em estufa. Esse fenômeno encontra respaldo na literatura, considerando que a liofilização opera em temperaturas reduzidas e em um ambiente isento de oxigênio, proporcionando uma eficaz preservação de compostos bioativos (AKCICEK et al., 2023; KOOP et al., 2022; RAMOS et al., 2017). A liofilização também contribui para a melhoria da disponibilidade dos compostos fenólicos para a extração, devido à estrutura porosa resultante do congelamento e da subsequente sublimação do gelo, que facilita a liberação dos compostos desejados. Em contrapartida, a secagem convencional, ao expor os resíduos a temperaturas mais altas na presença de oxigênio, exerce um impacto adverso na concentração de compostos fenólicos. Tempos prolongados de secagem convencional por ar quente podem ocasionar a degradação desses compostos, assim como afetar a atividade antioxidante das frutas (GOMES et al., 2022). Adicionalmente, a redução na concentração dos compostos fenólicos durante a secagem, mesmo em temperaturas moderadas, como 40 °C, pode ser atribuída à inativação ineficiente de enzimas oxidativas (GOMES et al., 2022). Ramos et al. (2017) verificaram uma redução máxima de aproximadamente 21% no conteúdo fenólico total durante a secagem convectiva do subproduto da uvaia, utilizando temperaturas entre 40 e 80 °C. A menor perda, em comparação com este estudo,

pode ser atribuída a diferenças nas características iniciais do subproduto da uvaia e a uma série de variáveis experimentais e condições específicas de secagem, tais como o fluxo de ar e o tempo de exposição.

Os valores alcançados neste estudo para a concentração de compostos fenólicos no resíduo de uvaia revelaram-se maiores ou próximos aos encontrados por outros pesquisadores para resíduos agroindustriais da família Myrtaceae, tais como pó de casca de jabuticaba liofilizada (3900 mg EAG 100 g⁻¹ BS) (BARROS et al., 2019), casca de feijoa seca (3247 mg EAG 100 g⁻¹ BS) (TUNCEL; YILMAZ, 2015), semente (3320,79 mg EAG 100 g⁻¹ BS) e casca de camu-camu liofilizada (821,81 mg EAG 100 g⁻¹ BS) (CUNHA-SANTOS et al., 2022) e casca de araçá vermelho (589 mg EAG 100 g⁻¹ BS) (MEREGALLI et al., 2020).

É evidente que a síntese endógena de polifenóis nas frutas varia qualitativa e quantitativamente devido a diferentes fatores externos, como condições climáticas, tipo de solo, região de cultivo e temperatura (CUNHA-SANTOS et al., 2022), e que os resultados podem variar conforme as condições de extração. No entanto, é incontestável que o resíduo de uvaia pode constituir uma valiosa fonte de compostos bioativos para consumo humano.

Os valores da atividade antioxidante dos resíduos (obtida por meio dos métodos ABTS^{•+}, DPPH[•] e FRAP) revelaram sólida correlação com os conteúdos significativos de compostos fenólicos totais. Diferenças substanciais foram observadas entre as amostras, sendo o resíduo *in natura* o que apresentou maior atividade antioxidante no método DPPH[•], registrando 29794 µmol TEAC 100 g⁻¹ BS, enquanto o resíduo seco em estufa (14 *mesh*) apresentou a menor atividade, com 7251 µmol TEAC 100 g⁻¹ BS. Padrão similar foi evidenciado no método FRAP, com o resíduo *in natura* exibindo a maior atividade antioxidante (31658 µmol TEAC 100 g⁻¹ BS) e o resíduo seco em estufa (14 *mesh*) a menor (6160 µmol TEAC 100 g⁻¹ BS). No método ABTS^{•+}, mais uma vez, o resíduo seco em estufa (14 *mesh*) apresentou a menor atividade (3930 µmol TEAC 100 g⁻¹ BS), enquanto o resíduo liofilizado 60 *mesh* demonstrou a atividade antioxidante mais elevada (27082 µmol TEAC 100 g⁻¹ BS).

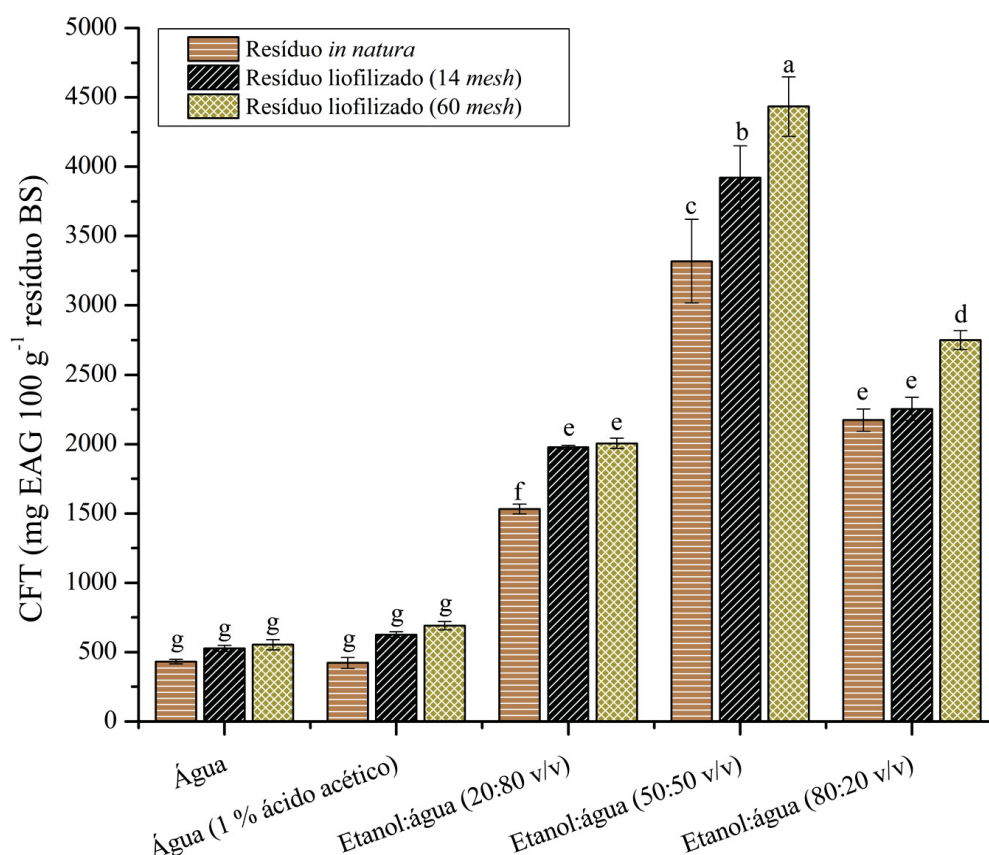
Com base nos resultados supracitados, a continuidade do estudo foi direcionada para os resíduos *in natura* e liofilizados, excluindo-se o resíduo seco em estufa devido à sua performance inferior no processo de extração.

4.3 EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS

4.3.1 Impacto do preparo da amostra e seleção do solvente de extração

A seleção do solvente destinado à extração de compostos fenólicos dos resíduos de uvaia foi conduzida com base nos resultados apresentados na FIGURA 18. Evidenciou-se que os solventes exercem influência distinta sobre as quantidades extraídas de compostos fenólicos, sendo essa eficácia fortemente dependente tanto do tipo de solvente quanto do pré-tratamento do resíduo, realizado por meio de secagem e peneiramento.

FIGURA 18 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS DE EXTRATOS DE RESÍDUOS DE UVAIA (*EUGENIA PYRIFORMIS* CAMBESS) OBTIDOS COM O USO DE DIFERENTES SOLVENTES



Condições de extração: proporção de 3,5:10 g de resíduo mL⁻¹ de solvente para o resíduo *in natura* e de 1:10 g de resíduo mL⁻¹ de solvente para os resíduos secos e liofilizados, temperatura de 35 °C, tempo de 30 min e agitação magnética a 500 rpm.

Valores expressos em base seca. EAG – Equivalentes de ácido gálico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Observou-se que tanto a água quanto a água acidificada resultaram em quantidades relativamente modestas de compostos fenólicos extraídos. A adição de ácido ao solvente de extração pode intensificar a extração de compostos fenólicos, especialmente antocianinas, por meio de mecanismos como a desnaturação da membrana celular induzida pelo ambiente ácido e a contribuição de íons hidrogênio livres para a estabilização da forma de cátion flavílio da antocianina (BARROS et al., 2019). No entanto, neste estudo, a acidificação da água evidenciou apenas um discreto aumento em relação à água não acidificada, possivelmente devido à baixa concentração de antocianinas na uvaia (DA SILVA et al., 2022) e ao impacto da trituração prévia das amostras sobre as membranas celulares.

Dentre os solventes avaliados, a solução contendo etanol e água na proporção de 50:50 (v/v) demonstrou a mais alta eficácia de extração, seguida pelas soluções etanol e água 80:20 e 20:80 (v/v). A significativa ($p < 0,05$) ampliação na extração de compostos fenólicos pelas soluções hidroetanólicas 50:50 (v/v) e 80:20 (v/v) em comparação à solução 20:80 (v/v) pode ser explicada pela redução da constante dielétrica do solvente (em função do aumento da concentração de etanol). Esta redução diminui a solvatação das moléculas na solução e, por conseguinte, promove um aumento na solubilidade e difusividade dos compostos fenólicos no solvente (ISLAM et al., 2023).

Como discutido por Mustafa e Turner (2011), a abordagem de utilizar combinações de solventes no processo de extração desempenha um papel determinante na otimização da eficácia dessa etapa. Em uma formulação de mistura binária, um solvente pode aprimorar a solubilidade do analito, enquanto o outro facilita sua liberação. Nesse contexto, a água desempenha um papel fundamental, contribuindo para a desestruturação da matriz e para a quebra das interações matriz-analito, especialmente as interações de hidrogênio. Além disso, tal fenômeno pode ser elucidado pelo princípio "semelhante dissolve semelhante". O solvente, com uma polaridade específica, extrai compostos fenólicos caracterizados por polaridades semelhantes à polaridade do solvente. Dessa forma, o aumento da parte aquosa no sistema orgânico-aquoso promove o aumento da polaridade até atingir um nível adequado para extrair a maioria dos compostos fenólicos da matriz (BENCHIKH et al., 2023). Adicionalmente, considerações econômicas e ambientais favorecem a utilização de misturas hidroalcólicas em detrimento de solventes alcoólicos puros (MUSTAFA; TURNER, 2011). Vale ressaltar ainda que a presença de concentrações

elevadas de etanol pode induzir à desidratação do tecido vegetal, à desnaturação de proteínas e limitar a solubilização dos compostos fenólicos (MALI; KUMAR, 2023).

Quanto à proporção ideal de água e etanol na formulação dos solventes, esta é determinada por uma variedade de fatores, incluindo os compostos alvo da extração, as características da matriz vegetal, a temperatura de operação, a duração do processo extrativo e a metodologia empregada (MALI; KUMAR, 2023). Consequentemente, a obtenção máxima de rendimento de compostos fenólicos a partir de diversas espécies vegetais requer a utilização de solventes com proporções variáveis entre etanol e água (CUNHA-SANTOS et al., 2022; MALI; KUMAR, 2023; TUNCEL; YILMAZ, 2015). Por exemplo, Cunha-Santos et al. (2022) otimizaram a formulação de solventes para a extração de compostos fenólicos de polpas, cascas e sementes da planta camu-camu, empregando um método de planejamento simplex-centróide. Para cascas e polpas, etanol aquoso a 80% (v/v) demonstrou eficácia, enquanto metanol aquoso a 50% (v/v) foi mais eficaz para sementes. Este estudo destaca a necessidade de adaptar solventes às diferentes partes da fruta, dada a variação na matriz, como a distribuição espacial dos compostos e possíveis diferenças na composição química das frações.

Tuncel e Yilmaz (2015) otimizaram a extração de compostos fenólicos e antioxidantes da feijoa por meio de um ensaio preliminar com diferentes concentrações de etanol em água (20%, 50% e 80%), tendo selecionado a combinação etanol:água de 80:20 (v/v) como a mais eficaz na extração dos compostos fenólicos totais.

Sganzerla et al. (2019) conduziram uma avaliação do impacto de três soluções (aquosa, etanol e hidroetanólica a 70%) na extração de compostos fenólicos da polpa de uvaia de doze plantas amostradas na região sul da Mata Atlântica do Brasil. O conteúdo fenólico foi de 0,27 (base úmida) e 4,3 g EAG kg⁻¹ (base úmida) para a solução aquosa e a hidroetanólica, respectivamente. De forma semelhante, Rufino et al. (2009) observaram que a extração da maioria dos compostos da polpa foi mais eficaz com hidroetanol, seguido de etanol e água puros (34,70, 107,14 e 189,41 mg de EAG 100 g⁻¹, respectivamente).

No entanto, Haminiuk et al. (2014) investigaram a aplicação de diversos solventes (metanol, etanol, água destilada, metanol/água 1:1 e etanol/água 1:1) para a extração de compostos fenólicos da polpa de uvaia. A concentração dos compostos fenólicos variou entre 255,91 e 588,31 mg EAG kg⁻¹ (base úmida). O metanol puro

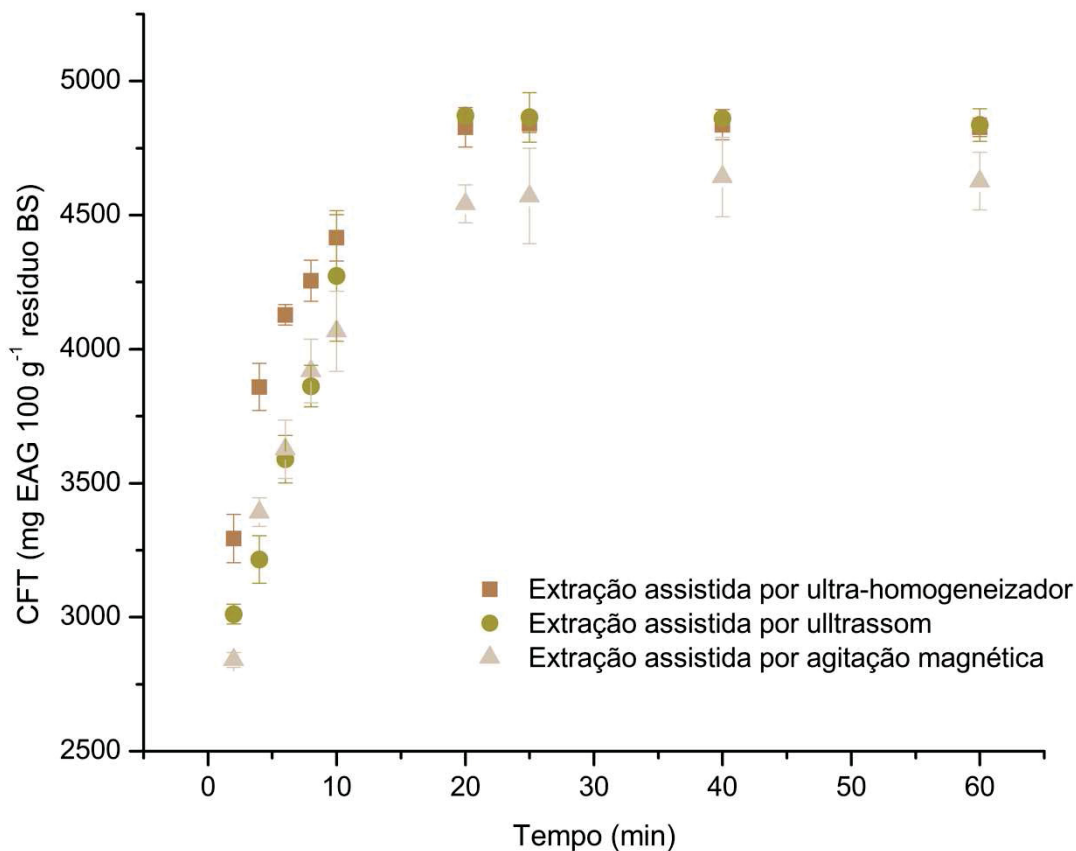
revelou-se o solvente mais eficaz, resultando nas maiores concentrações de ácidos fenólicos extraídos (ácido gálico, ácido cafeico e ácido ferúlico) e flavonóis (rutina, miricetina e kaempferol). Entretanto, é essencial ressaltar que o metanol é reconhecido como tóxico, enquanto o etanol é considerado mais seguro para o meio ambiente e adequado para consumo alimentar (MUNEKATA et al., 2023).

Com base nos resultados deste estudo, a solução etanol:água (50:50, v/v) foi selecionada para as subseqüentes fases da pesquisa, estabelecendo-se como a razão de solvente mais eficaz na extração de compostos fenólicos provenientes dos resíduos de uvaia. Adicionalmente, em relação à granulometria dos materiais, verificou-se que ambos os resíduos (aqueles que atravessaram a malha de 14 *mesh* e os que atravessaram a malha de 60 *mesh*) ostentam potencial como fontes de compostos bioativos de interesse alimentar, químico e farmacêutico. De maneira análoga, o resíduo *in natura* manifestou um elevado conteúdo fenólico. No entanto, o resíduo de 60 *mesh* foi selecionado para estudos adicionais devido ao aumento de 33% na extração de compostos fenólicos em comparação com o resíduo *in natura*. Esse aumento pode ser atribuído à maior área superficial para interações solvente-soluto, à porosidade da matriz e à maior disponibilidade dos compostos que estavam anteriormente associados à estrutura celular, como discutido anteriormente (SHI et al., 2022). Adicionalmente, esse resíduo se distingue pela maior durabilidade resultante da remoção de água, bem como pela homogeneidade, além de apresentar vantagens no que tange ao manuseio e armazenamento facilitados.

4.3.2 Seleção do método de extração

Na FIGURA 19 são apresentadas as cinéticas de extração de compostos fenólicos do resíduo de uvaia liofilizado (60 *mesh*) através das técnicas de extração assistida por ultrassom de banho, ultra-homogeneizador e agitação magnética, utilizando uma solução etanol:água (50:50 v/v) como solvente. Para todas as técnicas avaliadas, as curvas apresentaram um crescimento logístico da concentração dos compostos fenólicos extraídos. Adicionalmente, as concentrações observadas apresentaram flutuações inferiores a 5% entre os três últimos pontos temporais analisados, sem evidenciar diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$).

FIGURA 19 – CURVAS CINÉTICAS DA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DO RESÍDUO DE UVAIA POR EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRA-HOMOGENEIZADOR, EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM E EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR AGITAÇÃO MAGNÉTICA



Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), proporção de 1:10 (g de resíduo mL⁻¹ de solvente), temperatura de 35 °C. Ultra-homogeneizador operando a 4000 rpm e 800 W; ultrassom operando a 25 kHz e 120 W; agitação magnética a 500 rpm.

CFT – Conteúdo fenólico total. EAG – Equivalentes de ácido gálico. BS – Valores expressos em base seca.

A taxa inicial mais elevada de extração observada é atribuída a uma diferença de concentração mais expressiva do soluto entre a fase líquida e a superfície sólida. Além disso, foi relatado que a extração de compostos fenólicos é mais eficiente a partir da matriz externa das partículas sólidas. À medida que o tempo avança, a força motriz diminui, tornando mais desafiadora a extração dos compostos das partículas internas (SHEWALE; KAPADIA; RATHOD, 2022). Assim, no início, o processo é predominantemente convectivo, enquanto a difusão passa a dominar posteriormente. A taxa de extração é, portanto, regulada pela difusão interna na etapa avançada do processo.

Os resultados obtidos sugerem que a extração hidroetanólica de compostos fenólicos do resíduo de uvaia aproxima-se da condição de equilíbrio antes do final do período de observação avaliado (60 min). Além disso, destaca-se que um intervalo

temporal de 20 min se revela suficiente para a obtenção de uma extração eficiente de compostos bioativos quando se empregam as técnicas de ultrassom e ultra-homogeneizador. A partir deste momento, a concentração de compostos fenólicos não exibiu variações estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$).

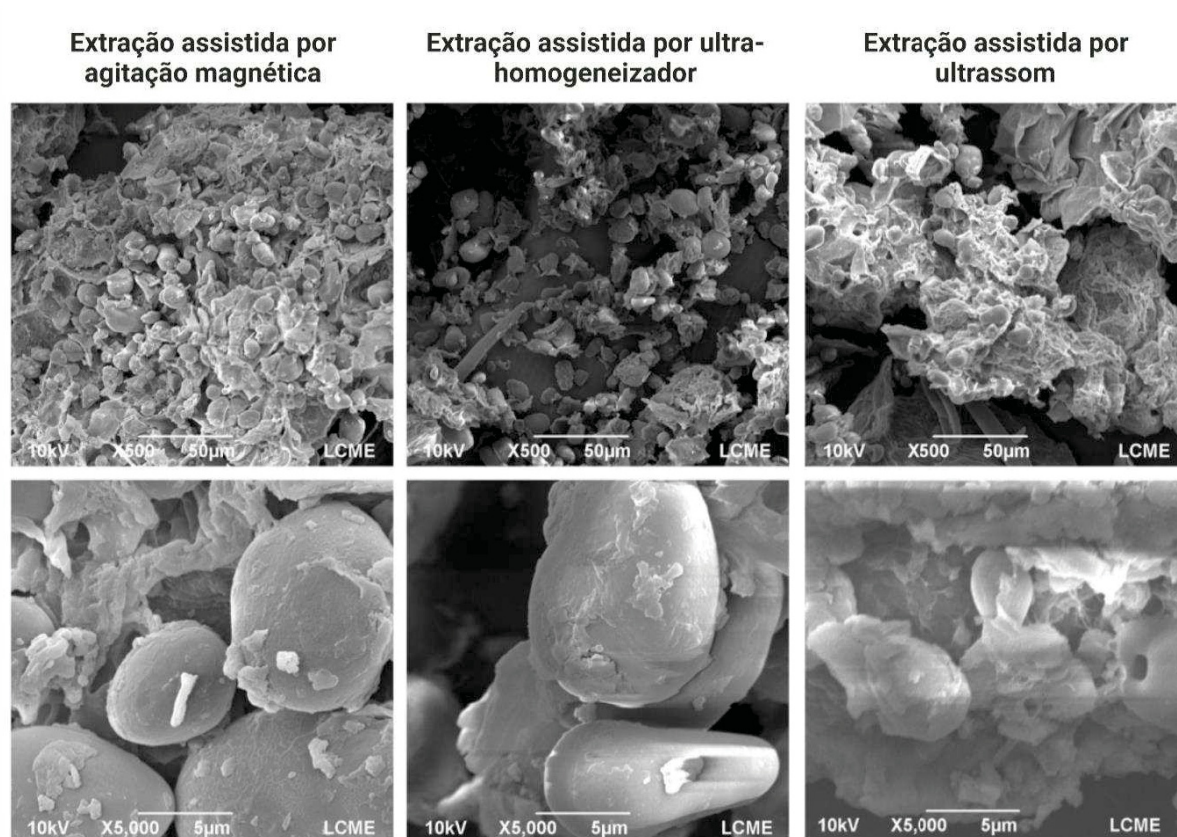
Ao término do processo de extração, constatou-se uma equiparação nos rendimentos entre os métodos de extração assistida por ultrassom e ultra-homogeneizador, embora as trajetórias cinéticas exibam nuances distintas. Adicionalmente, observou-se que as concentrações de compostos fenólicos alcançadas por meio dos métodos de ultrassom e ultra-homogeneizador superaram aquelas obtidas pelo método de agitação magnética durante o mesmo intervalo de tempo analisado. Em consonância com essas constatações, estudos anteriores de Santana, Zanini e Macedo (2020) sobre resíduos do processamento de guaraná (casca e sementes empobrecidas) corroboraram a eficiência comparável entre extração assistida por ultra-homogeneizador (15500 rpm e 500 W) e extração assistida por ultrassom em banho (a 60 Hz, 155 W e 60 °C), superando métodos como maceração, infusão e decocção.

A aplicação de altas acelerações no ultra-homogeneizador comumente resulta na formação de partículas menores e uniformes, otimizando a área de contato entre o solvente e as partículas do material, potencializando assim o rendimento de compostos bioativos (PROCOPET; OROIAN, 2022; XU et al., 2016). Esse método é caracterizado por sua simplicidade de execução, consumo reduzido de solvente e tempos de extração curtos (DANIELSKI et al., 2022; TOAZZA et al., 2022). Este estudo representa a primeira aplicação de altas forças de cisalhamento na recuperação de compostos valiosos do resíduo de uvaia. Por outro lado, a aplicação de ultrassom demonstrou provocar modificações na matriz alimentar, incluindo a ruptura de paredes celulares, diminuição do tamanho das partículas e aumento da superfície de contato, resultando em maior taxa de transferência de massa comparada a métodos convencionais (PATRA; ABDULLAH; PRADHAN, 2022). Além disso, as ondas ultrassônicas favorecem a expansão da matriz e a penetração do solvente, intensificando o transporte de massa, o que é particularmente benéfico para resíduos secos (TIWARI, 2015).

Para avaliar os efeitos mencionados dos tratamentos na morfologia estrutural do resíduo de uvaia, recorreu-se à microscopia eletrônica de varredura. A análise evidenciou que a morfologia das células no resíduo não tratado é mais íntegra e

suave, contrastando com os danos parciais e deformações superficiais induzidos pela ultrassonicação e pelas forças de cisalhamento do ultra-homogeneizador, conforme ilustrado nas micrografias obtidas após as extrações assistidas por ultrassom em banho, ultra-homogeneizador e agitação magnética (FIGURA 20).

FIGURA 20 – MICROGRAFIAS DE SUPERFÍCIE DOS RESÍDUOS DE UVAIA APÓS EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR AGITAÇÃO MAGNÉTICA, EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRA-HOMOGENEIZADOR E EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM



Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), proporção de 1:10 (g de resíduo mL⁻¹ de solvente), temperatura de 35 °C. Ultra-homogeneizador operando a 4000 rpm e 800 W; ultrassom operando a 25 kHz e 120 W; agitação magnética a 500 rpm.

Considerando os resultados apresentados e a similaridade no conteúdo fenólico total obtido pelos dois métodos de extração – extração assistida por ultra-homogeneizador e extração assistida por ultrassom – optou-se pela utilização da técnica de ultrassom nas fases subsequentes da pesquisa. A decisão fundamenta-se não apenas na eficácia da extração de compostos bioativos, mas também em sua versatilidade. Ao contrário do ultra-homogeneizador, que opera em batelada e com uma única amostra por vez, a técnica de ultrassom permite a condução simultânea da extração de múltiplas amostras, podendo proporcionar uma eficiência considerável

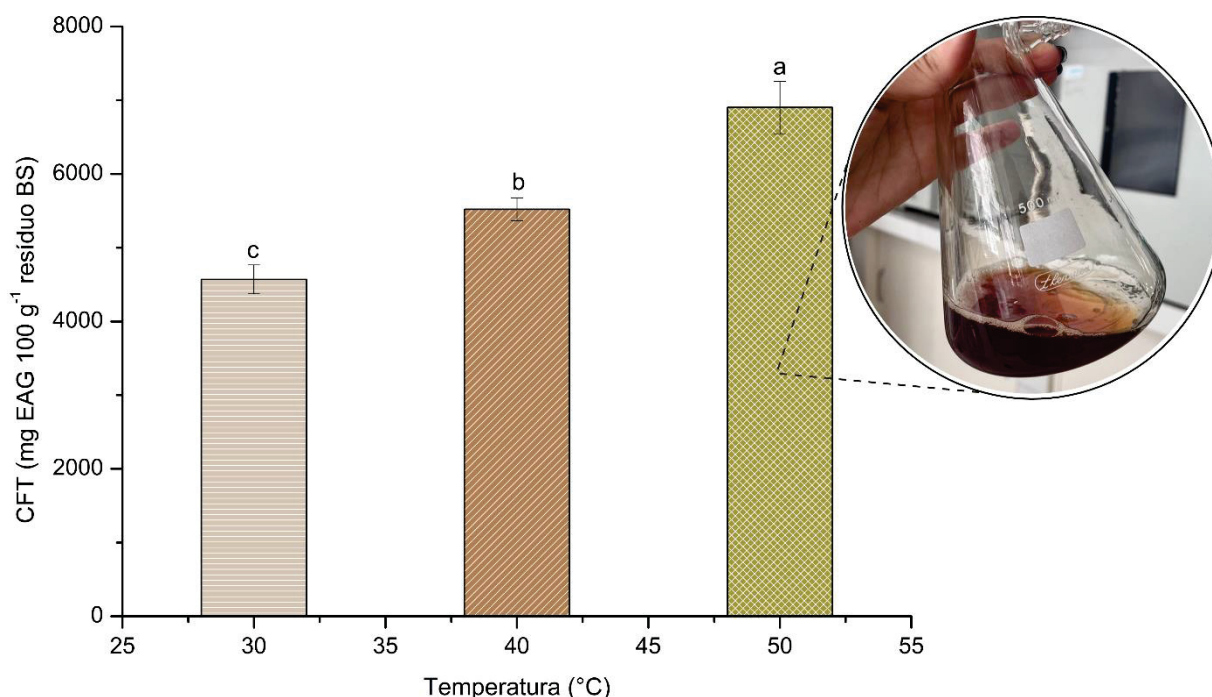
em termos de produtividade. Este aspecto pode ser particularmente relevante em contextos industriais, nos quais a capacidade de processamento de um volume maior de produto é essencial para otimização de recursos e redução de custos. A escalabilidade do ultra-homogeneizador, projetado para aplicações laboratoriais, apresenta desafios consideráveis em grandes volumes, devido à necessidade de ajustes na potência e tamanho do equipamento. A energia necessária para manter eficiência e homogeneidade aumenta exponencialmente com a escala, e garantir uma mistura uniforme é dificultado pela alta turbulência e cisalhamento exigidos em volumes maiores.

Embora exista uma ampla literatura sobre a extração assistida por ultrassom de compostos bioativos a partir de frutas, a relação entre cada variável e a transferência de massa no processo nem sempre se apresenta de maneira evidente. Assim, foi realizada uma avaliação dos parâmetros temperatura de extração e razão amostra/solvente, os quais podem exercer influência sobre o processo de extração, buscando identificar os valores que maximizem a extração dos compostos fenólicos do resíduo de uvaia.

4.3.3 Influência da temperatura de extração

A FIGURA 21 ilustra os resultados derivados das análises do conteúdo fenólico total nos extratos de resíduos de uvaia liofilizados (60 *mesh*), obtidos por meio da técnica de extração assistida por ultrassom, utilizando uma solução etanol:água (50:50, v/v). As análises foram conduzidas em diferentes temperaturas (30, 40 e 50 °C), enquanto se mantinham constantes o tempo de extração (20 min) e a relação sólido-solvente (1:10 g de resíduo:mL⁻¹ de solvente).

FIGURA 21 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE COMPOSTOS FENÓLICOS DO RESÍDUO DE UVAIA



Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), proporção de 1:10 (g de resíduo mL⁻¹ de solvente), tempo de 20 min. Ultrassom operando a 25 kHz e 120 W.

CFT – Conteúdo fenólico total. EAG – Equivalentes de ácido gálico. BS – Valores expressos em base seca. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A quantidade de compostos fenólicos presentes nos extratos variou entre 4570 (CV = 4%) e 6901 (CV = 5%) mg EAG 100 g⁻¹ BS. Estes achados destacam a sensibilidade da extração de compostos fenólicos em resposta às diferentes temperaturas testadas. Observou-se que incrementos nesse parâmetro conduziram a um aumento no conteúdo fenólico dos extratos, sem, contudo, evidenciar efeitos adversos de degradação nos níveis avaliados.

A correlação entre o aumento da temperatura e o incremento no conteúdo fenólico total, constatada neste estudo, também foi verificada por Rodrigues et al. (2021) ao abordar o resíduo de uvaia (casca e sementes) durante o emprego de extração assistida por ultrassom de sonda. A elevação controlada da temperatura de extração até um limite determinado pode aumentar a solubilidade dos analitos e o coeficiente de difusão, conduzindo, assim, a um processo de extração mais eficaz (TUNCEL; YILMAZ, 2015).

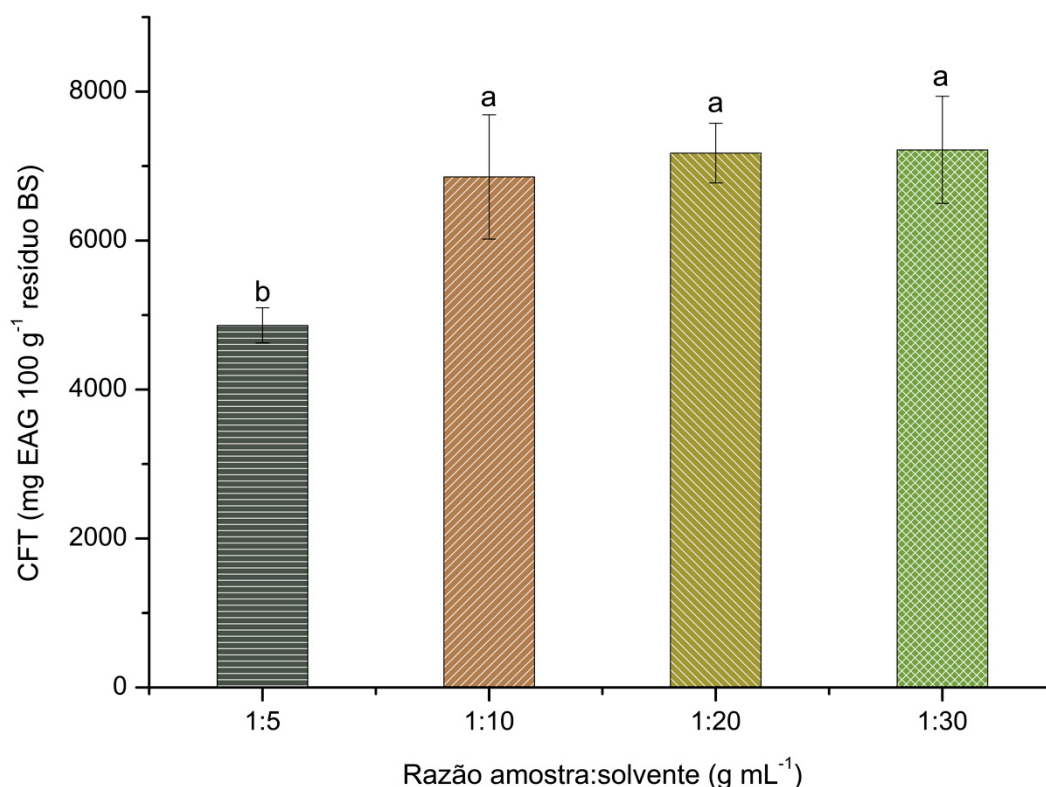
Embora temperaturas superiores a 50 °C não tenham sido exploradas neste estudo devido às limitações do equipamento utilizado, é importante considerar a

termolabilidade dos compostos fenólicos. Por essa razão, em estudos relacionados à frutos da família Myrtaceae, é comum utilizar temperaturas inferiores a 50 °C durante os processos de extração (BARROS et al., 2019; CUNHA-SANTOS et al., 2022; FARIAS et al., 2020a; FIDELIS et al., 2020a, 2020b; RODRIGUES et al., 2021). Nesse contexto, a escolha da temperatura de 50 °C é justificável, garantindo uma extração eficiente de compostos bioativos do resíduo de uvaia, ao mesmo tempo em que minimiza os possíveis efeitos adversos de degradação desses compostos. Portanto, essa temperatura foi selecionada para as próximas etapas desta pesquisa.

4.3.4 Influência da razão amostra/solvente

A FIGURA 22 ilustra os resultados das análises do conteúdo fenólico total presente nos extratos de resíduos de uvaia liofilizados (60 *mesh*), utilizando a técnica de extração assistida por ultrassom com uma solução etanol:água (50:50 v/v). A variação das razões de amostra-solvente (1:5, 1:10, 1:20 e 1:30 g de resíduo:mL⁻¹ de solvente) foi investigada em relação aos parâmetros constantes de tempo (20 min) e temperatura (50 °C). A análise da proporção entre amostra e solvente no conteúdo fenólico é fundamental para garantir eficiência na extração de compostos bioativos, desempenhando um papel significativo na prevenção do uso excessivo de solvente e, consequentemente, na redução dos custos do processo (SHEWALE; KAPADIA; RATHOD, 2022).

FIGURA 22 – INFLUÊNCIA DA RAZÃO AMOSTRA/SOLVENTE NA EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ULTRASSOM DE COMPOSTOS FENÓLICOS DO RESÍDUO DE UVAIA



Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), temperatura de 50 °C, tempo de 20 min.
 Ultrassom operando a 25 kHz e 120 W.

CFT – Conteúdo fenólico total. EAG – Equivalentes de ácido gálico. BS – Valores expressos em base seca.

Os resultados obtidos revelam que o conteúdo fenólico total extraído do resíduo de uvaia atingiu seu valor mínimo na proporção de 1:5 (g de resíduo de uvaia:mL de solvente). Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento da viscosidade da mistura, conforme observado visualmente, o que resultou na diminuição da taxa de transferência dos compostos fenólicos para o solvente. Além disso, o tempo de contato entre as fases de 20 min pode não ter sido o suficiente para se atingir a condição de equilíbrio dinâmico para a proporção de 1:5 ou ocorreu a saturação do solvente. A saturação do solvente implica que a capacidade de dissolução dos compostos fenólicos já foi atingida, e, portanto, um aumento no tempo de contato não resultaria em uma maior extração. O incremento no volume de solvente, por sua vez, resultou em um aumento na concentração de fenólicos totais para as demais condições examinadas. A elevação na proporção de solvente promove um aumento no gradiente de potencial químico, intensificando as taxas de transferência de massa.

No entanto, para o tempo de contato de 20 min, os valores de conteúdo fenólico total dos extratos foram estatisticamente equivalentes ($p \leq 0,5$) entre as proporções de 1:10 e 1:30 g mL⁻¹, indicando a possibilidade de redução da quantidade de solvente sem comprometer a resposta desejada para as condições estudadas. Essa constatação está alinhada com estudos anteriores, como o de Tuncel e Yilmaz (2015), que corroboram o comportamento semelhante na extração de compostos fenólicos de frutas da família Myrtaceae. No referido estudo, a quantidade de compostos fenólicos totais extraídos mostrou um aumento quase linear com o incremento da proporção de solvente (1:20, 1:40, 1:60 e 1:80 g mL⁻¹). Além disso, não houve diferença estatística entre as proporções de solvente para amostras de 1:60 e 1:80 ($p > 0,05$), levando os autores a selecionarem a proporção 1:60 como a mais apropriada para a extração de compostos fenólicos da feijoa.

Com base nos resultados obtidos, destaca-se que a proporção 1:10 g mL⁻¹ pode ser considerada a mais adequada para a extração de compostos fenólicos do resíduo de uvaia, dadas as condições de processo estudadas, apresentando rendimento similar às demais proporções e resultando em um extrato menos diluído. Isso não apenas otimiza os custos associados a uma eventual concentração subsequente do extrato, mas também reduz os gastos com solvente, estabelecendo-a como uma opção eficiente e econômica.

4.3.5 Concentração de compostos fenólicos e atividade antioxidante do extrato de resíduo de uvaia

Na TABELA 9 são apresentados os resultados obtidos nas condições previamente estabelecidas visando maximizar a concentração de compostos fenólicos extraídos do resíduo de uvaia. As variáveis controladas incluíram a utilização da solução etanol:água (50:50 v/v) como solvente, temperatura de 50 °C, tempo de 20 min e uma razão amostra:solvente de 1:10 g mL⁻¹. Sob essas condições, o extrato resultante revelou um conteúdo fenólico total significativo, atingindo 6855,46 mg EAG 100 g⁻¹ BS.

TABELA 9 – CONCENTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE EM EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDO SOB CONDIÇÕES APERFEIÇOADAS

Análise	Concentração
Conteúdo fenólico total (mg EAG 100 g ⁻¹ BS)	6855 (CV=6)
Atividade antioxidante (ABTS ^{•+}) (μmol TEAC 100 g ⁻¹ BS)	70393 (CV=7)
Atividade antioxidante (DPPH [•]) (μmol TEAC 100 g ⁻¹ BS)	40786 (CV=5)
Atividade antioxidante (FRAP) (μmol TEAC 100 g ⁻¹ BS)	69208 (CV=9)

BS – Valores expressos em base seca. CV – Coeficiente de variação (%). EAG – Equivalentes de ácido gálico. TEAC – Atividade antioxidante equivalente ao Trolox.

Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), temperatura de 50 °C, tempo de 20 min, Razão amostra:solvente de 1:10 g mL⁻¹. Ultrassom operando a 25 kHz e 120 W.

Comparativamente, o conteúdo fenólico total no extrato obtido superou significativamente o estudo anterior de Rodrigues et al. (2021). No mencionado estudo, foi conduzida a extração aquosa assistida por ultrassom dos compostos bioativos presentes no resíduo *in natura* de uvaia (casca e sementes) utilizando a proporção sólido-solvente de 1:4 (g mL⁻¹). O extrato resultante, obtido sob as condições otimizadas de 40 °C, 2,5 min e 40% de amplitude ultrassônica, apresentou um CFT de 54,645 mg GAE 100 g⁻¹ em base úmida (227,69 mg GAE 100 g⁻¹ em base seca). A disparidade entre os valores pode ser atribuída a variáveis como as condições de extração, solventes empregados, preparação da amostra (destacadamente, a trituração evidenciou-se como um fator incrementador da eficiência de extração), divergências na composição química de cada amostra e outras variáveis pertinentes.

Quando comparado com outros extratos, o extrato de resíduo de uvaia exibiu um conteúdo fenólico total semelhante ao do extrato de casca de camu-camu, obtido por extração assistida por ultrassom com etanol e água (50:50, v/v), que apresentou 6895 mg EAG 100 g⁻¹ (CUNHA-SANTOS et al., 2022) e ao extrato de semente de jabuticaba, obtido por agitação magnética com etanol, metanol e água (33,3:33,3:33,3 v/v/v), que apresentou 6551 mg EAG 100 g⁻¹ (FIDELIS et al., 2020b). Em contraste, o conteúdo fenólico do extrato de casca de feijoa, obtido com acetona e água (80:20 v/v) (TUNCEL; YILMAZ, 2015) e o extrato da casca de araçá-vermelho, extraído por ultrassom com etanol e água acidificada (90:10, v/v) (MEREGALLI et al., 2020), foram significativamente inferiores, apresentando 3247 e 589 mg EAG 100 g⁻¹, respectivamente. É importante considerar que a comparação entre diferentes extratos pode ser complexa devido às variações nos métodos e solventes utilizados. No entanto, os resultados destacam a eficácia do método de extração aplicado ao resíduo de uvaia e sua alta concentração de compostos fenólicos.

A avaliação da atividade antioxidante do extrato de uvaia foi realizada por meio das técnicas ABTS^{•+}, DPPH[•] e FRAP. Os valores obtidos para ABTS^{•+} (70393 $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$), DPPH[•] (40786 $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$) e FRAP (69208 $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BS}$) destacam a expressiva atividade antioxidante do extrato.

Em síntese, a extração abordada neste estudo resultou em um produto de elevado conteúdo fenólico e significativa atividade antioxidante. Diante destes resultados, propõe-se que o extrato de uvaia seja considerado para diversas aplicações na indústria alimentícia, farmacêutica e cosmética, como aditivo em alimentos processados, conservante natural, ingrediente funcional em produtos diversos, suplemento alimentar, nutracêutico ou componente em cosméticos e protetores solares, além de sua incorporação em embalagens alimentícias visando prolongar a vida útil dos produtos. Contudo, no que tange a tais aplicações, uma consideração fundamental que requer análise é a sensibilidade dos compostos fenólicos a diversos tipos de estresses ambientais, como elevadas temperaturas, flutuações de pH, exposição à luz e a presença ou ausência de oxigênio, entre outros fatores (LAUREANTI et al., 2023). Uma das estratégias a ser explorada como resposta a esta limitação é a microencapsulação, a qual será objeto de estudo na subsequente fase desta investigação.

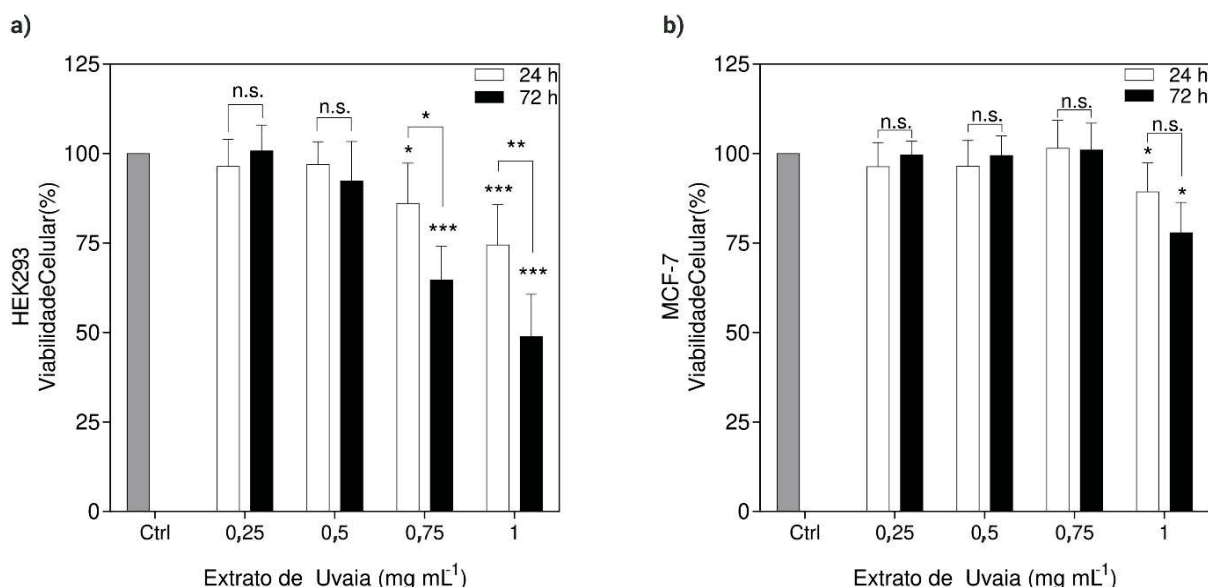
4.4 ENSAIO DE CITOTOXICIDADE

Os ensaios de citotoxicidade são fundamentais para avaliar a segurança e a eficácia de extratos bioativos. Este estudo investigou os efeitos citotóxicos do extrato de uvaia em diferentes linhas celulares, especificamente HEK293 (derivadas de células renais embrionárias humanas) e MCF-7 (derivadas de carcinoma de mama humano), para determinar a margem de segurança e possíveis propriedades antitumorais do extrato.

O tratamento de células HEK293 com extrato de uvaia em concentrações de até 0,5 mg mL^{-1} não manifestou efeitos citotóxicos, sugerindo uma margem de segurança para sua aplicação. Entretanto, doses mais elevadas (0,75 e 1 mg mL^{-1}) resultaram em uma diminuição significativa na viabilidade celular, evidenciando uma resposta citotóxica que foi tanto dose-dependente quanto tempo-dependente (FIGURA 23a). Similarmente, a exposição de células MCF-7 ao extrato de uvaia até 0,75 mg mL^{-1} não provocou efeitos citotóxicos, indicando uma ausência de atividade

antitumoral em tal concentração. Contudo, a concentração mais alta testada (1 mg mL^{-1}) resultou em uma redução significativa na viabilidade celular, evidenciando uma atividade antitumoral que também foi dose-dependente, porém independente do tempo de exposição (FIGURA 23b).

FIGURA 23 – ENSAIO DE VIABILIDADE CELULAR EM CÉLULAS DERIVADAS DE TECIDO RENAL EMBRIONÁRIO HUMANO (a) E CÉLULAS DERIVADAS DE CARCINOMA DE MAMA HUMANO (b)



O efeito citotóxico induzido pelo extrato de uvaia foi avaliado por meio do método MTT. As células HEK293 (a) e MCF-7 (b) foram expostas a concentrações crescentes do extrato ($0,25 - 1 \text{ mg mL}^{-1}$) por 24 e 72 h. Os dados representam a média $\pm$ desvio-padrão de, no mínimo, três experimentos independentes. O gráfico foi elaborado utilizando o software GraphPad Prism 6. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) unidirecional seguida pelo pós-teste de Kruskal-Wallis: Dunns (© 1995-2017 GraphPad Software). $p < 0,05$ (*); $p < 0,01$ (**); $p < 0,001$ (***).

O valor IG_{50} corresponde à concentração necessária para reduzir a viabilidade celular em 50%. O ensaio de viabilidade revelou que, após 24 h de exposição, o extrato de uvaia apresentou um valor IG_{50} superior à concentração mais alta testada (1 mg mL^{-1}) para ambas as linhagens celulares, indicando que a viabilidade celular não foi reduzida em 50%, mesmo com concentrações de 1 mg/mL . Aproximadamente 75% das células HEK293 e 90% das células MCF-7 permaneceram viáveis após 24 horas de exposição a essa concentração. Após 72 h de exposição a 1 mg mL^{-1} , a viabilidade das células HEK293 diminuiu para cerca de 48%, e o valor IG_{50} alterou para $>0,75 \text{ mg mL}^{-1}$, denotando uma maior sensibilidade das células HEK293 ao extrato com o decorrer do tempo. Em contrapartida, nas células MCF-7, observou-se uma redução sutil e não significativa na viabilidade, a qual permaneceu em torno de

78% após 72 h, mantendo o valor de IG_{50} inalterado. Isso sugere uma menor sensibilidade das células MCF-7 ao extrato de uvaia, especialmente em exposições prolongadas.

A partir das evidências apresentadas, o extrato de uvaia demonstrou potencial antitumoral contra células MCF-7 em concentrações elevadas, contudo estas concentrações mostraram-se tóxicas para células normais HEK293. Para que o extrato de uvaia possa ser considerado um candidato terapêutico viável, é essencial explorar modificações em sua formulação ou método de administração visando aumentar sua seletividade. Uma estratégia promissora seria a combinação com agentes terapêuticos que potencializem sua ação antitumoral enquanto protegem células normais, potencialmente reduzindo a dose necessária e minimizando a toxicidade. Além disso, é fundamental realizar estudos adicionais para elucidar os mecanismos moleculares e bioquímicos subjacentes aos efeitos do extrato de uvaia na indução da morte celular, tanto em células tumorais quanto em células normais. A identificação dos compostos específicos responsáveis pela atividade antitumoral e toxicidade pode contribuir para otimizar sua eficácia terapêutica. Assim, a investigação de diferentes solventes para extração pode resultar em extratos com perfis variados de compostos bioativos, toxicidade e atividades anticancerígenas (ASHRAF et al., 2016).

Esta abordagem poderá conduzir à descoberta de extratos com uma melhor relação entre eficácia antitumoral e segurança para células normais, potencializando o valor terapêutico do extrato de uvaia. Nesse sentido, a continuidade dos estudos *in vitro* e *in vivo* é essencial para validar os novos extratos, compreender seus mecanismos de ação e avaliar seu perfil de segurança. Adicionalmente, testes em uma gama mais ampla de linhagens celulares tumorais são necessários para determinar a especificidade e amplitude da atividade antitumoral do extrato de uvaia.

4.5 MICROENCAPSULAÇÃO DO EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA

4.5.1 Identificação e quantificação de compostos fenólicos do extrato de resíduo de uvaia

A análise realizada por CLAE revelou a presença de nove compostos fenólicos no extrato de resíduo de uvaia não encapsulado, conforme detalhado na TABELA 10.

TABELA 10 – COMPOSTOS FENÓLICOS QUANTIFICADOS POR CLAE EM EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA

Compostos	Extrato (mg L ⁻¹)
<i>Ácidos fenólicos</i>	
Ácido cafeico	1,1 ± 0,0
Ácido cumárico	ND
Ácido ferúlico	ND
Ácido vanílico	ND
Ácido siríngico	4,0 ± 0,1
Ácido gálico	48,0 ± 0,0
Ácido clorogênico	17,5 ± 0,1
<i>Flavonóides</i>	
Quercetina	ND
Isoquercetina	6,1 ± 0,0
Rutina	4,6 ± 0,9
Procianidina	25,9 ± 0,9
Cianidina	0,7 ± 0,0
Catequina	13,7 ± 0,1

ND: não detectado.

Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), temperatura de 50 °C, tempo de 20 min, Razão amostra:solvente de 1:10 g mL⁻¹. Ultrassom operando a 25 kHz e 120 W. Remoção do solvente por rotaevaporação.

O ácido gálico emergiu como o principal composto fenólico, com uma concentração de 48,0 mg L⁻¹. Este ácido é amplamente reconhecido por suas atividades biológicas diversificadas, incluindo propriedades anticancerígenas, antimicrobianas e antioxidantes, observadas em uma ampla gama de frutas e vegetais (MARTINOVIĆ et al., 2024). Outro composto significativo identificado foi o ácido clorogênico, valorizado por suas propriedades antioxidantes e seus potenciais benefícios à saúde, particularmente devido às suas ações anti-inflamatórias, anticancerígenas e moduladoras da glicose (KIM et al., 2023). O ácido siríngico, também identificado, destaca-se por suas propriedades antioxidantes, além de sua ação hepatoprotetora, anti-inflamatória, antidiabética e neuroprotetora (MARTINOVIĆ et al., 2024). O ácido cafeico também foi detectado, sendo conhecido por sua capacidade de inibir compostos associados a doenças imunológicas e reações alérgicas, além de possuir atividade antitumoral, particularmente no câncer de cólon (HURKUL et al., 2024).

Além dos ácidos fenólicos, foram detectados dois flavonoides: a isoquercetina e a rutina. Estes flavonoides são reconhecidos por suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias. A isoquercetina tem sido utilizada em ensaios clínicos que investigam o tratamento do câncer renal (KIM et al., 2023). A rutina, um rutinosídeo

composto por quercetina ligada aos açúcares glicose e ramnose na posição C-3, tem sido utilizada terapeuticamente para reduzir a fragilidade capilar (KIM et al., 2023).

Outros flavonoides identificados incluem a procianidina e a catequina. A procianidina é particularmente relevante por sua capacidade de proteção celular e seus efeitos anti-inflamatórios e anticâncer (HURKUL et al., 2024). A catequina é fundamental devido às suas propriedades promotoras da saúde, incluindo benefícios cardiovasculares e atividades antioxidantes (MARTINOVIĆ et al., 2024). Por fim, a cianidina, uma antocianina identificada em menor concentração ($0,7 \text{ mg L}^{-1}$), faz parte de um grupo de pigmentos vegetais com propriedades antioxidantes bem documentadas (HURKUL et al., 2024). Esses fitoquímicos desempenham um papel fundamental na promoção da saúde e na proteção contra doenças, além de serem valorizados na indústria de alimentos por suas propriedades como antioxidantes naturais, conservantes e agentes de melhoria de sabor, aroma e cor dos produtos (MUNEKATA et al., 2023).

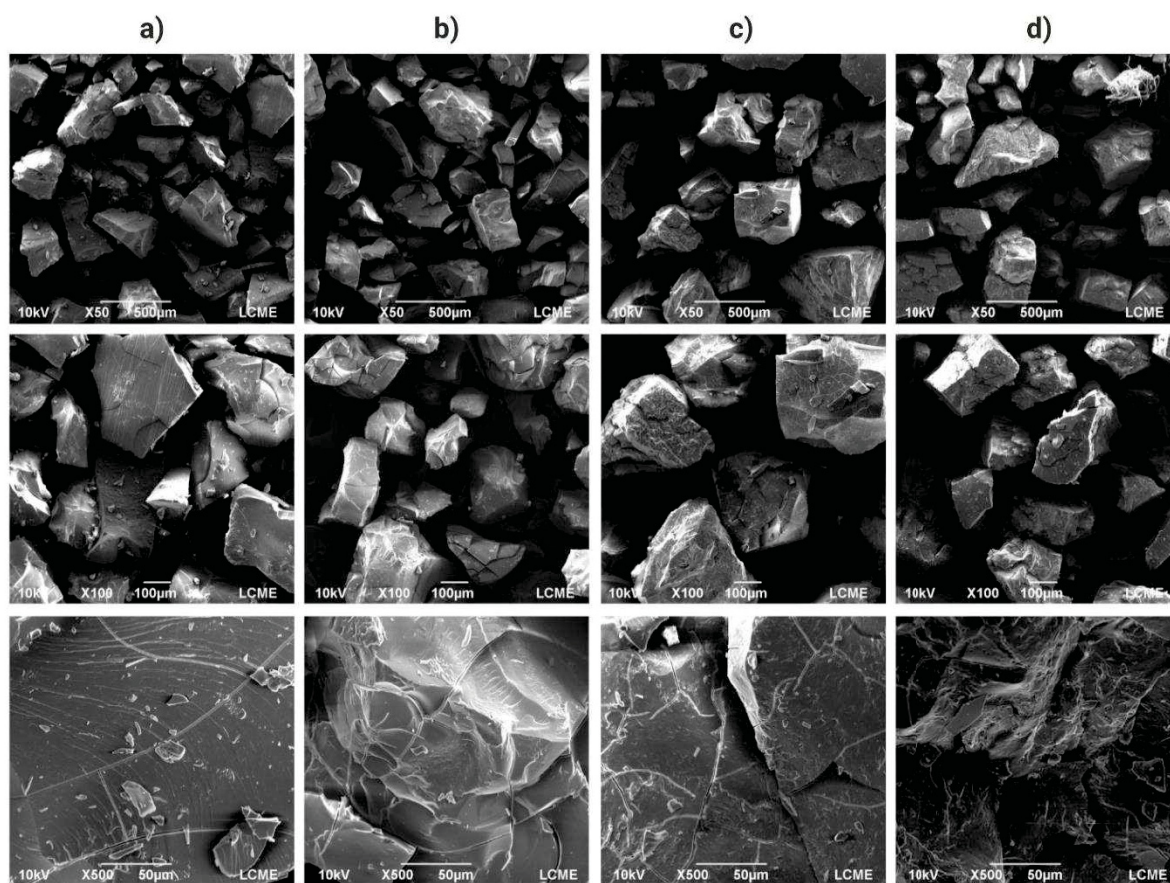
Rodrigues et al. (2021) identificaram treze compostos fenólicos no resíduo de uvaia (ácido ascórbico, ácido p-cumárico, ácido gálico, ácido clorogênico, epicatequina, taxifolina, rutina, miricetina, quercetina, isoquercetina, quercetina-3-o-pentosídeo, quercitrina e bellidifolina-8-o-glicosídeo), destacando os níveis de ácido gálico ($2,043 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BU}$) e ácido elágico ($1,859 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ BU}$). Por outro lado, Farias et al. (2020b) identificaram dezessete compostos fenólicos na polpa de uvaia, enquanto nove compostos foram encontrados nas sementes, englobando ácidos fenólicos, flavonóis, flavan-3-óis monoméricos e flavonas. As variações na quantidade e tipo de compostos fenólicos identificados podem ser atribuídas a fatores genéticos e ambientais que afetam a composição fitoquímica dos frutos, assim como aos métodos de extração e aos solventes utilizados (DA SILVA et al., 2022). É importante destacar que a identificação dos compostos fenólicos no presente estudo foi limitada aos padrões de compostos fenólicos disponíveis para análise. Portanto, outros compostos fenólicos presentes no extrato podem não ter sido identificados ou quantificados.

4.5.2 Caracterização físico-química, análise instrumental e avaliação das propriedades funcionais das micropartículas

4.5.2.1 Morfologia de superfície

A morfologia das micropartículas de extrato de resíduo de uvaia produzidas por liofilização, utilizando diferentes proporções de maltodextrina, goma arábica e/ou inulina como agentes encapsulantes, é apresentada na FIGURA 24.

FIGURA 24 – MICROGRAFIAS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDAS POR LIOFILIZAÇÃO UTILIZANDO a) 25% MALTODEXTRINA, b) 12,5% MALTODEXTRINA + 12,5% GOMA ARÁBICA, c) 20% MALTODEXTRINA + 5% INULINA e d) 10% MALTODEXTRINA + 10% GOMA ARÁBICA + 5% INULINA



A análise morfológica revelou que, independentemente da composição utilizada, as micropartículas exibiram uma estrutura caracterizada por formas irregulares e fragmentadas de vários tamanhos, com bordas agudas e superfície rugosa. Essas características são provavelmente atribuídas à redução do tamanho

das partículas durante a homogeneização de alta velocidade aplicada durante a preparação das formulações, bem como à moagem com pistilo após o processo de secagem por liofilização. Esse resultado está alinhado com estudos anteriores, como os conduzidos por Kuck e Noreña (2016) sobre micropartículas de extrato de casca de uva bordô, por Fuentes et al. (2023) sobre micropartículas de extrato de resíduo de mamão e por Yamashita et al. (2017) sobre micropartículas de extrato de subproduto de amora-preta obtidas por liofilização, os quais descreveram as partículas como tendo formato de vidro quebrado.

A liofilização frequentemente resulta na formação de partículas com tamanhos e formas não uniformes, o que representa desafios na manutenção da qualidade das micropartículas (HUANG; YUAN; BAOJUN, 2023). A morfologia das micropartículas desempenha um papel importante na microencapsulação, influenciando diversas propriedades, tais como a homogeneidade do produto, características reológicas, capacidade de proteção dos compostos bioativos e a cinética de liberação do núcleo (HUANG; YUAN; BAOJUN, 2023; OXLEY, 2014).

4.5.2.2 Umidade, atividade de água (a_w), cor instrumental, densidade aparente, solubilidade e higroscopicidade

Na TABELA 11 são apresentados os dados das propriedades físico-químicas, parâmetros cromáticos e propriedades de reconstituição das micropartículas de extrato de resíduo de uvaia. Tais informações desempenham um papel essencial na caracterização e avaliação da qualidade das micropartículas, influenciando diretamente sua estabilidade, aceitação e aplicabilidade. Observou-se uma relativa homogeneidade entre as diferentes formulações analisadas.

TABELA 11 – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS, PARÂMETROS DE COR E PROPRIEDADES DE RECONSTITUIÇÃO DE MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDAS POR LIOFILIZAÇÃO USANDO MALTODEXTRINA, GOMA ARÁBICA E/OU INULINA

Propriedade	Extrato Líquido	Formulação			
		1	2	3	4
Umidade (%)		2,1 ± 0,1 ^a	2 ± 0,2 ^a	1,6 ± 0,4 ^a	2,2 ± 0,6 ^a
Atividade de água		0,154 ± 0,008 ^a	0,15 ± 0,01 ^a	0,142 ± 0,003 ^a	0,162 ± 0,005 ^a
<i>Parâmetros de cor (micropartículas)</i>					
L*		78,57 ± 0,08 ^a	75,0 ± 0,2 ^d	77,26 ± 0,09 ^b	76,8 ± 0,2 ^c
a*		5,8 ± 0,2 ^c	7,5 ± 0,2 ^a	5,21 ± 0,03 ^d	7,06 ± 0,04 ^b
b*		20,4 ± 0,3 ^b	25,2 ± 0,3 ^a	20,6 ± 0,1 ^b	24,6 ± 0,4 ^a
Croma (C*)		21,2 ± 0,2 ^b	26,3 ± 0,3 ^a	21,2 ± 0,1 ^b	25,6 ± 0,4 ^a
Ângulo de matiz (h°)		1,29 ± 0,01 ^b	1,28 ± 0,01 ^b	1,32 ± 0,00 ^a	1,29 ± 0,00 ^b
<i>Parâmetros de cor (reconstituição*)</i>					
L*	66 ± 2 ^b	74 ± 3 ^a	72 ± 4 ^{ab}	70 ± 2 ^{ab}	69 ± 1 ^{ab}
a*	7,5 ± 0,2 ^a	0,9 ± 0,7 ^b	2 ± 2 ^b	3 ± 2 ^b	2,88 ± 1,01 ^b
b*	45 ± 2 ^a	24 ± 2 ^b	30 ± 5 ^b	30 ± 5 ^b	30 ± 5 ^b
Croma (C*)	46 ± 2 ^a	24 ± 2 ^b	30 ± 5 ^b	30 ± 5 ^b	29 ± 5 ^b
Ângulo de matiz (h°)	1,40 ± 0,00 ^b	1,53 ± 0,03 ^a	1,49 ± 0,05 ^a	1,48 ± 0,03 ^{ab}	1,47 ± 0,02 ^{ab}
Densidade aparente (g mL ⁻¹)		0,77 ± 0,04 ^a	0,75 ± 0,02 ^a	0,78 ± 0,02 ^a	0,75 ± 0,02 ^a
Solubilidade (%)		91 ± 2 ^a	92,4 ± 0,8 ^a	92 ± 2 ^a	93 ± 2 ^a
Higroscopicidade (g 100 g ⁻¹)		11,5 ± 0,7 ^a	11,9 ± 0,2 ^a	11,1 ± 0,3 ^a	11,6 ± 0,7 ^a

Formulações: 1) 25% maltodextrina, 2) 12,5% maltodextrina + 12,5% goma arábica, 3) 20% maltodextrina + 5% inulina e 4) 10% maltodextrina + 10% goma arábica + 5% inulina. *As amostras de micropartículas reconstituídas foram preparadas dissolvendo-se 0,5 g de micropartículas em 2 mL de água. Média ± desvio padrão (três repetições). Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey (p ≤ 0,05).

A umidade das micropartículas variou de 1,6 a 2,2%, não apresentando diferenças significativas entre as formulações (p ≤ 0,05). Em geral, os produtos encapsulados à base de frutas por liofilização, utilizando maltodextrina e goma arábica como agentes encapsulantes, exibem umidade inferior a 5%, cumprindo os requisitos estabelecidos para produtos alimentícios em pó (< 10%) (AMAYA; FUENMAYOR; CÓRDOBA, 2022; KOBO; KASEKE; FAWOLE, 2022; YAMASHITA et al., 2017). A presença de umidade nos pós impacta significativamente a fluidez, viscosidade e estabilidade durante o armazenamento, devido aos efeitos diretos na transição vítrea e no processo de cristalização (MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023). Um conteúdo de água inferior a 5% fornece vantagens significativas ao prevenir a aglomeração das partículas e melhorar a dispersão do pó, fatores cruciais para a estabilidade e vida útil

dos produtos encapsulados (TANGARIFE; ARIAS; ZAPATA, 2021). Destaca-se que a coalescência de partículas e a aglomeração de pós podem comprometer a retenção dos componentes ativos nas micropartículas (SAAH et al., 2024). Portanto, os resultados sugerem que todas as amostras de micropartículas podem apresentar estabilidade sob condições adequadas de armazenamento.

Quanto à atividade de água, todas as micropartículas apresentaram valores de $a_w < 0,17$. A atividade de água é um parâmetro crítico para a estabilidade de produtos desidratados, pois está diretamente relacionada à disponibilidade de água para reações químicas e o crescimento microbiano (RODRIGUES et al., 2018b). Os valores ficaram abaixo do limiar necessário para evitar o crescimento e proliferação de microrganismos ($\leq 0,6$), bem como para prevenir a geração de sabores indesejados e a perda significativa de compostos relacionados a aroma, sabor e cor (GARCÍA-CHACÓN et al., 2024). Estes resultados estão em conformidade com estudos anteriores que avaliaram a atividade de água de micropartículas à base de frutas obtidas por liofilização (AMAYA; FUENMAYOR; CÓRDOBA, 2022; FUENTES et al., 2023). Dessa forma, as formulações avaliadas forneceram micropartículas com baixa atividade de água, o que contribui para a preservação das características físico-químicas e sensoriais dos produtos.

Em relação à cor, as micropartículas foram avaliadas utilizando os parâmetros L^* , a^* , b^* , croma e ângulo de matiz. Os resultados indicaram variações significantes na coloração das micropartículas conforme a composição da formulação empregada. O parâmetro L^* , associado à luminosidade ou brilho da cor, oscilou entre 75,0 e 78,57. Os valores mais elevados de L^* foram registrados nas formulações contendo maltodextrina, enquanto formulações contendo goma arábica apresentaram valores inferiores. Essa disparidade pode ser atribuída à cor naturalmente marrom claro da goma arábica, contrastando com a tonalidade branca da maltodextrina, devido às diferentes composições de açúcares e ao complexo arabinogalactano-proteína (SAAH et al., 2024).

Os parâmetros a^* e b^* forneceram *insights* sobre a tonalidade da cor, com o eixo a^* variando de verde (-) a vermelho (+) e o eixo b^* de azul (-) a amarelo (+). Valores positivos em a^* indicaram tonalidades avermelhadas, enquanto valores negativos indicaram tonalidades esverdeadas. Da mesma forma, valores positivos em b^* denotaram tonalidades amareladas, enquanto valores negativos representaram tonalidades azuladas. Os valores de a^* variaram entre 5,21 e 7,5, enquanto os valores

de b^* variaram entre 20,4 e 25,2. Destaca-se que a formulação 2 apresentou os maiores valores em a^* e b^* , sugerindo uma tonalidade mais avermelhada e amarelada. Além disso, o croma, uma medida da saturação da cor, variou entre 21,2 e 26,3. A formulação 2 demonstrou o maior valor de croma, indicando uma coloração mais saturada em comparação com as demais formulações. O ângulo de matiz, que reflete a tonalidade dominante da cor em um espaço cromático, manteve-se consistente em torno de 1,28 e 1,32.

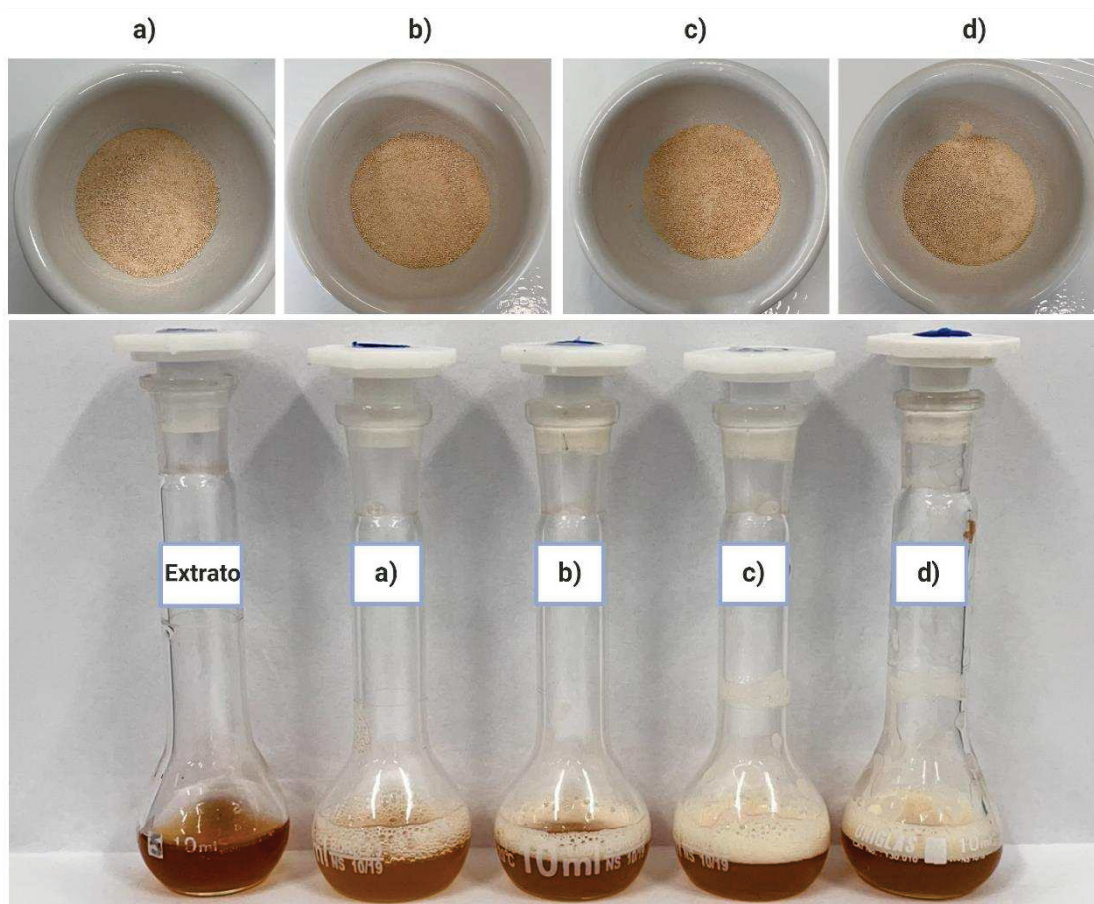
Um padrão semelhante foi observado em micropartículas de extrato de resíduo de mamão obtidas por liofilização (FUENTES et al., 2023). A cor das micropartículas com menor concentração de maltodextrina apresentou menor luminosidade, enquanto a cor das micropartículas com maior concentração de maltodextrina demonstrou maior luminosidade, sugerindo que micropartículas com menor conteúdo de maltodextrina exibiram cor mais intensa (expressa pelas coordenadas a^* e b^*) (FUENTES et al., 2023). Similarmente, a luminosidade das micropartículas de suco de mirtilo contendo maltodextrina obtidas por liofilização foi superior àquela das amostras preparadas apenas com goma arábica (AMAYA; FUENMAYOR; CÓRDOBA, 2022).

Com o intuito de avaliar a cor das micropartículas após reconstituição em meio líquido, preservando a proporção original de líquido antes da secagem, procedeu-se à dissolução das micropartículas em água e à medição dos parâmetros de cor L^* , a^* , b^* , croma e ângulo de matiz. A formulação 1, constituída exclusivamente de maltodextrina, destacou-se pela maior luminosidade, resultando em uma tonalidade mais clara em comparação com as demais formulações. Os valores de a^* variaram de 0,9 a 2,88 para todas as formulações, não apresentando diferenças significativas entre elas ($p \leq 0,05$), indicando tonalidades avermelhadas. Quanto aos valores de b^* , oscilando entre 24 e 30, todos foram positivos, denotando tonalidades amareladas e sem diferenças significativas entre as formulações ($p \leq 0,05$). Os valores de croma variaram de 24 a 30, sugerindo uma saturação similar entre as formulações. Observou-se que os valores do ângulo de matiz foram semelhantes entre as formulações, indicando uma tonalidade de cor similar.

A cor do produto é uma característica física essencial, influenciada pelas condições de processamento, e tem um impacto direto na percepção da qualidade pelo consumidor (TANGARIFE; ARIAS; ZAPATA, 2021). Portanto, a consideração da cor é fundamental na seleção dos parâmetros operacionais e dos agentes

encapsulantes durante o processo de microencapsulação (TANGARIFE; ARIAS; ZAPATA, 2021). Em comparação ao extrato líquido não encapsulado, as micropartículas reconstituídas apresentaram uma cor mais clara, menos avermelhada, menos amarelada e menos saturada. Contudo, conforme ilustrado na FIGURA 25, as micropartículas reconstituídas exibiram uma coloração particularmente atraente, sugerindo que o processo de microencapsulação com os agentes selecionados foi eficaz na proteção dos compostos corantes durante a secagem. Esses resultados indicam que as micropartículas derivadas do resíduo de uvaia possuem um grande potencial para aplicação como corantes naturais na indústria alimentícia.

FIGURA 25 – IMAGENS DIGITAIS PARA COMPARAÇÃO DAS CORES ENTRE O EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA E AS MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES ENCAPSULANTES ANTES E APÓS A RECONSTITUIÇÃO



Formulações: a) 25% maltodextrina, b) 12,5% maltodextrina + 12,5% goma arábica, c) 20% maltodextrina + 5% inulina e d) 10% maltodextrina + 10% goma arábica + 5% inulina. As amostras de micropartículas reconstituídas foram preparadas dissolvendo-se 0,5 g de micropartículas em 2 mL de água.

Pesquisas anteriores corroboram o potencial de micropartículas provenientes de extratos de frutos e resíduos da família Myrtaceae como corantes naturais. Por exemplo, Baldin et al. (2016) demonstraram que o extrato de resíduo de jabuticaba microencapsulado pode substituir eficientemente o corante carmim de cochonilla em linguças frescas, reduzindo a oxidação lipídica do produto. A mesma abordagem mostrou-se promissora para a produção de mortadela, contribuindo para o desenvolvimento de produtos enriquecidos com antioxidantes (BALDIN et al., 2018).

Com base nesses resultados, sugere-se que micropartículas de resíduo de uvaia possam ser integradas em uma ampla variedade de produtos, incluindo carnes, bebidas lácteas, sucos, refrigerantes, sorvetes, doces, balas e produtos de panificação, como bolos, pães e biscoitos. Além de conferir atributos cromáticos, essas micropartículas têm o potencial de adicionar características adicionais, como sabor, odor e propriedades antioxidantes. Dessa forma, essas micropartículas podem oferecer uma alternativa mais versátil e prática em comparação com o extrato líquido, apresentando possíveis vantagens em termos de dispersão, manuseio, armazenamento e transporte (FIGUEIREDO et al., 2020).

No que diz respeito à densidade aparente das micropartículas, os valores variaram entre 0,75 e 0,78 g mL⁻¹, não evidenciando diferenças estatisticamente significativas entre as formulações ($p \leq 0,05$). Estes resultados foram ligeiramente inferiores aos relatados para micropartículas de extrato da casca do maracujá obtidos por liofilização, utilizando goma arábica e maltodextrina como materiais de revestimento, os quais foram de 0,82 e 0,81 g mL⁻¹, respectivamente (KOBO; KASEKE; FAWOLE, 2022). A densidade aparente das micropartículas é diretamente afetada por sua densidade intrínseca, tamanho, formato e umidade, características intimamente ligadas ao material de revestimento e à técnica de encapsulação utilizada (CHOUDHURY; MEGHWAL; DAS, 2021). A análise da densidade é fundamental, fornecendo informações essenciais sobre embalagem, armazenamento e comportamento durante a distribuição (CHOUDHURY; MEGHWAL; DAS, 2021). Partículas menos densas podem demandar embalagens de menor volume, resultando em custos reduzidos de embalagem, transporte e armazenamento (KOBO; KASEKE; FAWOLE, 2022).

Quanto à solubilidade, todas as formulações apresentaram valores elevados (> 90%), indicando uma boa capacidade de dissolução. Este resultado era previsível, considerando que tanto a maltodextrina quanto a goma arábica são altamente solúveis

em água (SAAH et al., 2024). Resultados similares foram observados em micropartículas de suco de mirtilo produzidas por liofilização, empregando maltodextrina e goma arábica como agentes encapsulantes ($> 91,9\%$) (AMAYA; FUENMAYOR; CÓRDOBA, 2022), assim como em pós encapsulados com extrato da casca do maracujá, obtidos por liofilização e utilizando goma arábica como material de revestimento ($91,33\%$) (KOBÓ; KASEKE; FAWOLE, 2022). Essa propriedade é inerente às micropartículas e é influenciada pelo material do revestimento e pela técnica de produção utilizada (CHOUDHURY; MEGHWAL; DAS, 2021).

Destaca-se que a solubilidade é uma característica essencial para a aplicação prática dos pós em diversas formulações de alimentos e bebidas, determinando a velocidade com que as partículas de pó se dissolvem, se dispersam e se umedecem completamente (TANGARIFE; ARIAS; ZAPATA, 2021). Este aspecto desempenha um papel fundamental na reconstituição do pó e na disponibilidade dos compostos encapsulados (TANGARIFE; ARIAS; ZAPATA, 2021). Quanto menor a solubilidade do pó, mais desafiador é seu processamento na indústria de alimentos, podendo resultar em possíveis perdas econômicas (KONARÉ et al., 2023).

Por fim, a higroscopicidade das micropartículas, referente à capacidade de absorção de umidade em ambientes de alta umidade relativa, desempenha um papel crítico na estabilidade do material encapsulado (MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023). Este fenômeno afeta a estabilidade, funcionalidade e aplicação de uma amostra encapsulada (FUENTES et al., 2023). Tal característica está intrinsecamente relacionada ao material do revestimento empregado nas micropartículas (CHOUDHURY; MEGHWAL; DAS, 2021).

Os valores de higroscopicidade ($11,1$ a $11,9$ g 100 g $^{-1}$) não apresentaram variações significativas entre as formulações ($p \leq 0,05$), sugerindo que a presença de goma arábica e inulina não influenciou de maneira expressiva a capacidade dos pós de absorver água. Valores de higroscopicidade semelhantes foram relatados para o extrato de casca de mamão encapsulado ($11,8$ a $13,9$ g 100 g $^{-1}$) (FUENTES et al., 2023) e para o extrato do subproduto da amora-preta encapsulado ($11,27$ g 100 g $^{-1}$) (YAMASHITA et al., 2017), empregando maltodextrina como material de parede e liofilização como método de microencapsulação, devido à natureza pouco higroscópica da maltodextrina.

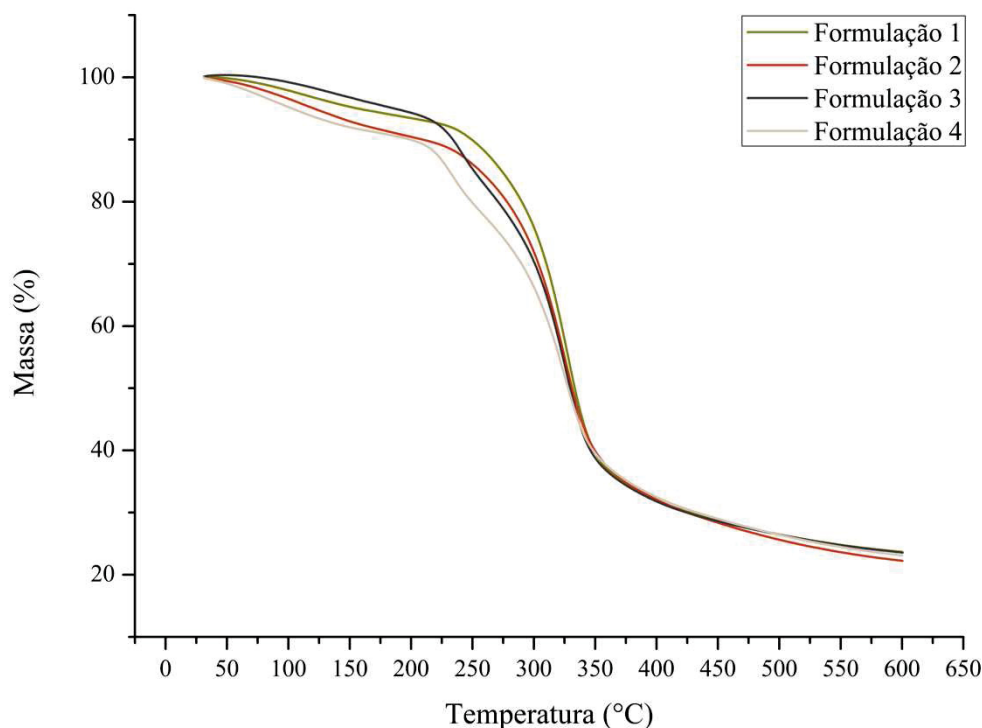
Considerando que a higroscopicidade do pó pode ser classificada como higroscópica ($15,1$ – 20%), levemente higroscópica (10 – 15%) e não higroscópica ($<$

10%) (KOBO; KASEKE; FAWOLE, 2022), a baixa higroscopicidade das micropartículas de extrato de resíduo de uvaia fornece uma vantagem considerável. Isso se traduz em maior estabilidade para o material encapsulado, mitigando a aglomeração de partículas e retardando o processo de deterioração. Tais características também facilitam o armazenamento e transporte dos produtos, especialmente em ambientes de alta umidade relativa.

4.5.2.3 Estabilidade térmica

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada com o objetivo de investigar as variações de massa das micropartículas contendo extrato de resíduo de uvaia, submetidas a um regime de aquecimento na faixa de temperatura de 30 a 600 °C. Os resultados, apresentados na FIGURA 26, revelaram três estágios principais de perda de massa.

FIGURA 26 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DE MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES ENCAPSULANTES



Formulações: 1) 25% maltodextrina, 2) 12,5% maltodextrina + 12,5% goma arábica, 3) 20% maltodextrina + 5% inulina e 4) 10% maltodextrina + 10% goma arábica + 5% inulina.

O primeiro estágio, ocorrendo até cerca de 150 °C, demonstrou uma perda de massa leve (< 8%) em todas as formulações. Essa perda pode ser atribuída à

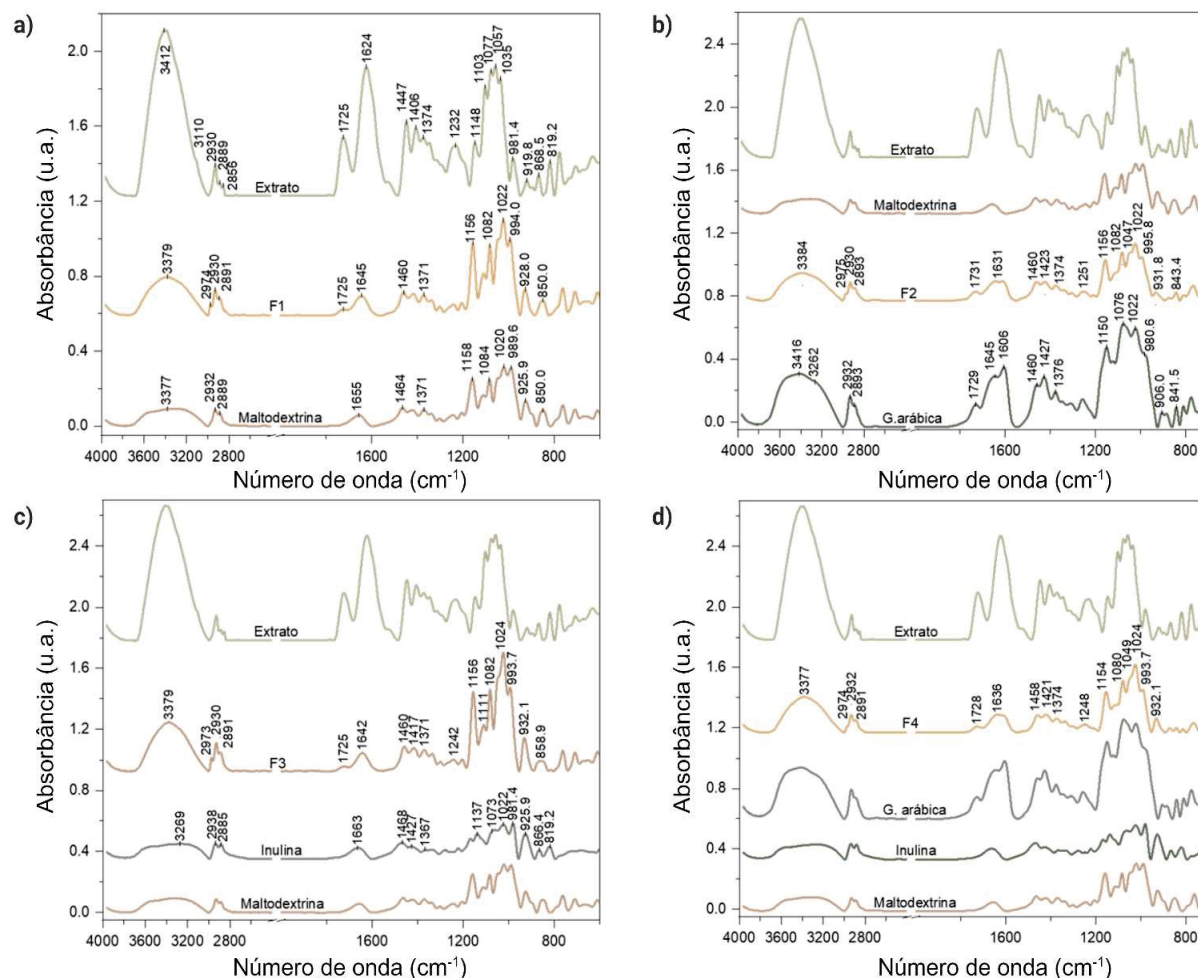
evaporação de compostos voláteis não encapsulados e à eliminação de água não ligada nas amostras (LAUREANTI et al., 2023). O segundo estágio, observado entre 225-280 °C (variando conforme a formulação) e em torno de 360 °C, foi marcado por uma degradação térmica mais pronunciada, principalmente associada à decomposição dos materiais encapsulantes. Durante essa fase, a despolimerização dos polissacarídeos em monômeros, como sacarose e glicose, e a desnaturação das proteínas, resultante da ruptura das ligações peptídicas, contribuíram para a perda de massa (DA ROCHA; NOREÑA, 2021). Esse processo também pode ter promovido a degradação dos compostos fenólicos dispersos na matriz dos pós (DA ROCHA; NOREÑA, 2021). Nas formulações contendo inulina (3 e 4), a degradação começou mais cedo em comparação com as demais, sugerindo que a inulina comprometeu a estabilidade térmica dos pós. Esse comportamento é consistente com observações anteriores em pós de extrato de *Hibiscus acetosella* encapsulado com goma arábica e inulina (MAR et al., 2020). Todas as formulações apresentaram um pico de degradação principal em torno de 325 °C, indicando o estágio de degradação mais acentuada dos agentes encapsulantes.

O terceiro estágio, compreendido entre 360 e 600 °C, foi caracterizado por uma decomposição mais lenta e uniforme, associada à degradação final dos materiais de parede e à carbonização dos resíduos (LAUREANTI et al., 2023). Esses resultados indicam que as micropartículas de extrato de resíduo de uvaia podem resistir aos processos térmicos típicos das indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética, sem comprometer suas propriedades funcionais devido à decomposição térmica.

4.5.2.4 Identificação de grupos funcionais e estrutura química

A eficácia do carregamento do extrato de resíduo de uvaia em micropartículas e as interações potenciais entre os materiais de revestimento e o extrato foram avaliadas por meio de análise de espectroscopia de absorção de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR). Na FIGURA 27 estão representados os espectros de FT-IR dos materiais encapsulantes puros, do extrato de resíduo de uvaia (núcleo) e das micropartículas resultantes.

FIGURA 27 – ESPECTROS DE FT-IR DE MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES ENCAPSULANTES



Formulações: a) 25% maltodextrina, b) 12,5% maltodextrina + 12,5% goma arábica, c) 20% maltodextrina + 5% inulina e d) 10% maltodextrina + 10% goma arábica + 5% inulina.

Os materiais encapsulantes puros maltodextrina e inulina apresentaram espectros vibracionais no infravermelho característicos de moléculas de carboidratos. A banda de absorção alargada entre 3600 e 3000 cm^{-1} foi atribuída à vibração de estiramento de grupos hidroxilas (n O-H) e de água residual. Vibrações de estiramentos do grupo metila (n -CH_3) e metileno (n -CH_2) foram observados entre 2938 e 2885 cm^{-1} , associadas as suas vibrações de deformação (d) entre 1371 e 1464 cm^{-1} para a maltodextrina. A região entre 1100 e 900 cm^{-1} evidenciou os modos vibracionais de estiramento C-O de grupos acetais e hemiacetais de carboidratos como a maltodextrina e inulina, com cinco bandas intensas em 1158, 1084, 1020, 990 e 925 cm^{-1} no espectro da maltodextrina (SAAH et al., 2024; SILVERSTEIN; WEBSTER; KIEMLE, 2005). A banda em 850 cm^{-1} pode ser atribuída aos carbonos anoméricos das ligações α -D-1,4 da estrutura da maltodextrose. No espectro da

inulina, as bandas em 820 e 867 cm^{-1} foram atribuídas aos carbonos anoméricos da α -D-glucose e β -D-frutose presentes nesse carboidrato (YANG; ZHANG, 2009). O espectro da maltodextrina pura apresentou uma banda em 1655 cm^{-1} atribuída aos grupos carboxila livres (AMAYA; FUENMAYOR; CÓRDOBA, 2022).

O espectro vibracional da goma arábica exibiu as bandas características de carboidratos, bastante similar aos espectros da inulina e maltodextrose. A banda de deformação em 1606 e o ombro em 1645 cm^{-1} indicam a presença de grupos amino (d N-H), provavelmente originários de aminoácidos na estrutura da goma arábica. Além disso, o espectro da goma arábica pura revelou uma banda de absorção em 1729 cm^{-1} , essa banda associada ao estiramento observado em cerca de 3400 cm^{-1} do grupo OH confirmam a presença do grupo funcional ácido carboxílico na amostra analisada (BARBOSA, 2007). A vibração de estiramento em 3262 cm^{-1} (ombro) e deformações do grupo N-H de amina primária, em conjunto com as bandas do grupo ácido carboxílico, além das vibrações características de carboidratos confirmam a presença de uma glucoproteína (SILVERSTEIN; WEBSTER; KIEMLE, 2005). Por fim, a banda em 841 cm^{-1} pode ser atribuída ao carbono anomérico da β -D-galactopiranosose (YANG; ZHANG, 2009).

Os espectros vibracionais do extrato de resíduo de uvaia evidenciaram a vibração de estiramento do grupo carbonila (n -C=O), a qual em conjunto com o estiramento da hidroxila em 3412 cm^{-1} caracterizam a função ácido carboxílico, grupo funcional presente na estrutura química da hemicelulose e lignina. Vibrações características de grupos aromáticos, presentes na estrutura da lignina, são evidenciadas nas bandas de estiramento em 1624 e 1447 cm^{-1} (n -C=C), e são corroborados pela presença da banda de estiramento do grupo metila em 3110 cm^{-1} (n -CH) (SILVERSTEIN; WEBSTER; KIEMLE, 2005). A banda em 1232 cm^{-1} é característica do estiramento C-O de fenóis, grupo funcional presente na unidade base de fenil propano formador da macromolécula tridimensional e amorfa da lignina (SUOTA et al., 2021). Além da lignina e hemicelulose, bandas de carboidratos compatíveis com a celulose seguem o padrão dos espectros de maltodextrina e inulina. As bandas vibracionais em 1148, 1103, 1077, 1035 e 981 cm^{-1} apontam para a presença de funções éteres e álcoois dos carboidratos, enquanto o pico em 868 cm^{-1} revela a presença de carbono anomérico, característico de açúcares (PRABHU; VAIDEKI; ANITHA, 2017).

Os espectros das micropartículas exibiram as faixas características dos encapsulantes correspondentes e do extrato de resíduo de uvaia, sem a identificação de novas bandas ou mudanças significativas nos picos. Isso sugere que o processo de microencapsulação não promoveu a formação de novas ligações entre o material de revestimento e o extrato, indicando a ausência de interações significativas entre eles. A ausência de novas bandas ou alterações significativas nos espectros indica que o extrato de resíduo de uvaia foi encapsulado de maneira eficaz nas micropartículas, preservando suas propriedades químicas. Esses resultados corroboram estudos anteriores que utilizaram materiais semelhantes para a microencapsulação de compostos bioativos por liofilização (ESTUPIÑAN-AMAYA; FUENMAYOR; LÓPEZ-CÓRDOBA, 2022; MAZUCO et al., 2018; SAAH et al., 2024).

4.5.2.5 Eficiência de encapsulação

A eficiência de encapsulação de compostos fenólicos em micropartículas constitui uma variável crítica, refletindo a capacidade de incorporação desses compostos bioativos. Tal eficiência é influenciada por uma interação complexa de fenômenos, incluindo interações hidrofóbicas, ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas e forças de *Van der Waals* (MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023). Diversos fatores, como a composição e concentração do material de revestimento, as interações entre o material do núcleo e os encapsulantes, e os métodos de preparação das micropartículas, desempenham papéis significativos na eficiência de encapsulação (HUANG; YUAN; BAOJUN, 2023).

Os resultados obtidos revelaram uma elevada eficiência de encapsulação em todas as formulações testadas, com valores próximos de 99%, o que destaca a eficácia da liofilização e a seleção adequada das matrizes encapsulantes. Especificamente, a formulação 1 apresentou uma eficiência de $99,1 \pm 0,1\%$, enquanto a formulação 2 registrou $99,11 \pm 0,05\%$. A formulação 3 obteve uma eficiência de $99,1 \pm 0,1\%$, e a formulação 4 apresentou o valor mais elevado, atingindo $99,2 \pm 0,1\%$.

Foi relatado anteriormente que a eficiência está diretamente relacionada à concentração do material do núcleo utilizado no processo de encapsulação, com a eficiência diminuindo à medida que os níveis do material do núcleo aumentam (CHOUDHURY; MEGHWAL; DAS, 2021). Portanto, conclui-se que a quantidade de extrato de resíduo de uvaia utilizada na microencapsulação foi apropriada para evitar

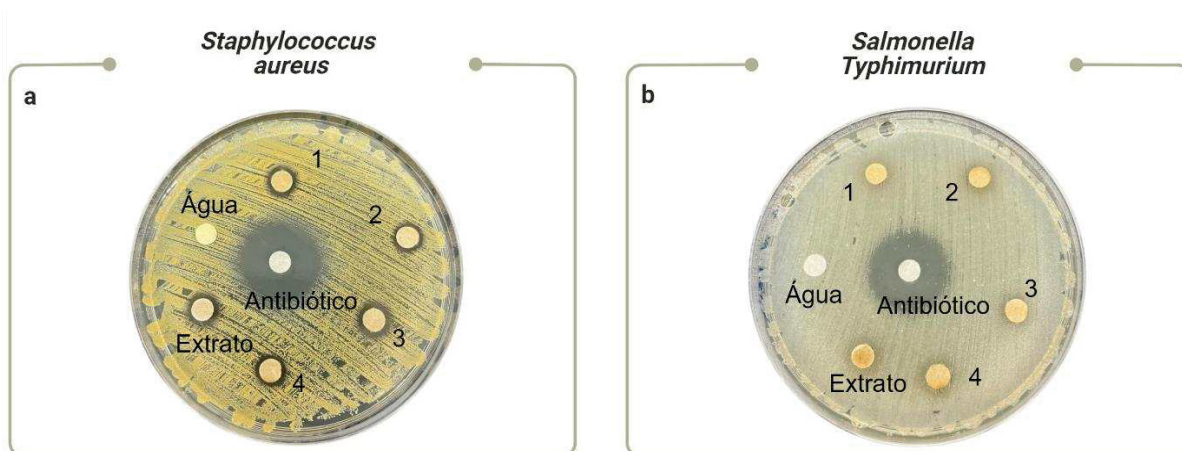
o desperdício de compostos bioativos durante o processo. Valores similares foram observados para a eficiência de encapsulação do extrato de bagaço de cereja ácida (*Prunus cerasus* L.) (PAVLOVIĆ et al., 2023) e do extrato de casca de cebola roxa, ambos microencapsulados com maltodextrina por liofilização, que apresentaram eficiência de 91,62% e 91,50%, respectivamente (ELSEBAIE; ESSA, 2018).

4.5.2.6 Atividade antimicrobiana

A utilização de extratos vegetais como agentes antimicrobianos tem sido amplamente investigada devido ao seu potencial em controlar microrganismos patogênicos responsáveis por doenças alimentares e deterioração de alimentos (ALDAVE et al., 2019; HALL et al., 2023; ISSURIYA et al., 2024; MACHADO et al., 2018). O mecanismo de atividade antimicrobiana de muitos extratos vegetais é frequentemente atribuído a compostos fenólicos, os quais podem interagir com a membrana celular, inativar enzimas essenciais e/ou formar complexos com íons metálicos, limitando sua disponibilidade para o metabolismo microbiano (DOS SANTOS et al., 2023). Tradicionalmente, a indústria utiliza conservantes químicos para prevenir a proliferação de patógenos, mas essa prática apresenta desvantagens, como a formação de resíduos nos alimentos, o desenvolvimento de resistência bacteriana e potenciais riscos à saúde humana (ISSURIYA et al., 2024). Portanto, há uma necessidade urgente de alternativas mais seguras e eficazes.

Neste contexto, avaliou-se a atividade antimicrobiana do extrato e das micropartículas de extrato de resíduo de uvaia contra duas cepas bacterianas: *Staphylococcus aureus* e *Salmonella Typhimurium*. As imagens das placas de Petri utilizadas no ensaio de difusão em disco são apresentadas na FIGURA 28.

FIGURA 28 – TESTE DE SENSIBILIDADE AOS ANTIMICROBIANOS PELO MÉTODO DE DISCO-DIFUSÃO UTILIZANDO EXTRATO E MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES AGENTES ENCAPSULANTES



Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), temperatura de 50 °C, tempo de 20 min, Razão amostra:solvente de 1:10 g mL⁻¹. Ultrassom operando a 25 kHz e 120 W. Rotaevaporação do etanol.

Formulações: 1) 25% maltodextrina, 2) 12,5% maltodextrina + 12,5% goma arábica, 3) 20% maltodextrina + 5% inulina e 4) 10% maltodextrina + 10% goma arábica + 5% inulina. Antibiótico: Cloranfenicol 30 µg.

A Figura 28a revela halos de inibição ao redor dos discos impregnados com o extrato e as micropartículas de extrato de resíduo de uvaia, indicando uma clara atividade antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus*. Em contraste, a Figura 28b mostra que, para *Salmonella Typhimurium*, os halos de inibição não são claramente definidos. Observa-se apenas um leve sombreado ao redor dos discos de filtro, sugerindo uma atividade antimicrobiana incipiente, insuficiente para causar uma inibição visível e mensurável do crescimento bacteriano.

A maior susceptibilidade de *Staphylococcus aureus*, uma bactéria Gram-positiva, em comparação com *Salmonella Typhimurium*, uma bactéria Gram-negativa, pode ser atribuída às diferenças estruturais de suas paredes celulares (LOBIUC et al., 2023). Esse comportamento é consistente com resultados observados em um estudo anterior com extratos de sementes de *Syzygium jambolanum*, da família Myrtaceae, que também demonstraram maior eficácia antimicrobiana contra bactérias Gram-positivas como *Staphylococcus aureus* (CHANDRASEKARAN; VENKATESALU, 2004). Nesse estudo, os extratos foram testados contra seis cepas bacterianas: *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Typhimurium*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae* e *Escherichia coli*. As zonas de inibição variaram de 2 a 20 mm, com menor atividade para *E. coli* (2-7 mm) e *Salmonella* (4-9 mm) e maior para *S. aureus* (4-10 mm).

As bactérias Gram-positivas apresentam maior vulnerabilidade a compostos fenólicos devido à alta concentração de peptidoglicanos em sua superfície e à ausência de uma membrana externa (LOBIUC et al., 2023). Os grupos funcionais na parede celular dessas bactérias facilitam a interação com os fenólicos, que podem danificar a parede celular por meio dos grupos hidroxílicos, que interagem com os peptidoglicanos (LOBIUC et al., 2023). Em contraste, a parede celular das bactérias Gram-negativas, composta por uma membrana externa, uma camada de peptidoglicano e uma membrana interna, proporciona maior resistência aos fenólicos devido aos altos níveis de fosfolipídios na membrana externa lipofílica (LOBIUC et al., 2023). O mecanismo antimicrobiano envolve a interação dos grupos hidroxílicos com as bicamadas lipídicas, resultando em alterações nas lipoproteínas e aumento da permeabilidade da membrana celular (LOBIUC et al., 2023).

Os diâmetros dos halos de inibição, mensurados para representar a área onde o crescimento bacteriano foi suprimido pela ação antimicrobiana das amostras, estão apresentados na TABELA 12.

TABELA 12 – DIÂMETROS DOS HALOS DE INIBIÇÃO PARA DIFERENTES CEPAS BACTERIANAS TESTADAS COM EXTRATO E MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA OBTIDAS POR LIOFILIZAÇÃO USANDO MALTODEXTRINA, GOMA ARÁBICA E/OU INULINA

Amostra	Diâmetro do halo (mm)	
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Salmonella Typhimurium</i>
Extrato	10,7 ± 0,1 ^b	-
Micropartícula 1	9,7 ± 0,1 ^b	-
Micropartícula 2	9,7 ± 0,1 ^b	-
Micropartícula 3	10,0 ± 0,0 ^b	-
Micropartícula 4	10,3 ± 0,1 ^b	-
Cloranfenicol (controle positivo)	21,3 ± 0,1 ^a	21,7 ± 0,1
Água (controle negativo)	0 ± 0	0 ± 0

Condições de extração: solução etanol: água (50:50 v/v), temperatura de 50 °C, tempo de 20 min, Razão amostra:solvente de 1:10 g mL⁻¹. Ultrassom operando a 25 kHz e 120 W. Rotaevaporação do etanol. Formulações micropartículas: 1) 25% maltodextrina, 2) 12,5% maltodextrina + 12,5% goma arábica, 3) 20% maltodextrina + 5% inulina e 4) 10% maltodextrina + 10% goma arábica + 5% inulina. Média ± desvio padrão (três repetições). Médias seguidas pela mesma letra em uma mesma coluna não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey (p ≤ 0,05).

Os halos observados para *Staphylococcus aureus* variaram de 9,7 a 10,7 mm. Os controles empregados validaram os resultados obtidos, visto que o cloranfenicol, um antibiótico de amplo espectro, exibiu halos de inibição conforme esperado (BRCAST-EUCAST, 2024), enquanto a água não apresentou nenhum halo. Além disso, microencapsulação do extrato utilizando diferentes agentes encapsulantes preservou a eficácia antimicrobiana contra *S. aureus* em comparação com o extrato não encapsulado. A similaridade nos diâmetros dos halos de inibição entre as várias formulações de micropartículas sugere que a escolha específica dos encapsulantes não impactou significativamente a eficácia antimicrobiana dos compostos. Isso evidencia a flexibilidade na seleção de formulações, que pode ser orientada por fatores como custo, disponibilidade e propriedades tecnológicas desejadas para o produto.

A literatura científica ainda carece de um critério padronizado para a avaliação da eficiência antimicrobiana de extratos vegetais. Contudo, ao aplicar extratos vegetais em alimentos, halos de inibição entre 8 e 13 mm podem ser classificados como moderadamente inibitórios, enquanto halos superiores a 14 mm são considerados altamente inibitórios (DE SOUZA et al., 2023). Com base nesses parâmetros, os resultados obtidos com o extrato e as micropartículas do extrato de resíduo de uvaia são encorajadores e sugerem um potencial considerável para sua utilização como conservantes naturais na indústria alimentícia.

Pesquisas anteriores demonstram uma variação considerável na atividade antimicrobiana de extratos vegetais obtidos de diferentes frutos da família Myrtaceae (ALDAVE et al., 2019; CHANDRASEKARAN; VENKATESALU, 2004; MAVANZA; OMWENGA; NGUGI, 2023). Essa variação pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a concentração e a interação complexa entre os componentes presentes nos extratos (ETGETON et al., 2024). Entretanto, discrepâncias nos métodos de extração, na concentração dos extratos e nas condições dos ensaios de atividade antimicrobiana, como a padronização do inóculo bacteriano e a quantidade de extrato aplicada nos discos, dificultam comparações diretas entre diferentes estudos. Por exemplo, o extrato de bagaço liofilizado de uvaia (casca, sementes e polpa) (1:5 g mL⁻¹), obtido por extração assistida por ultrassom com etanol a 80%, seguido de rotaevaporação, demonstrou uma atividade antimicrobiana significativa. Este extrato apresentou zonas de inibição de 21 mm para *Listeria monocytogenes*, 22 mm para *Listeria innocua*, 20 mm para *Bacillus cereus* e 25 mm para *Staphylococcus aureus*,

utilizando 40 µL do extrato—o dobro do volume utilizado no presente estudo (DOS SANTOS et al., 2023). Em contraste, o extrato da semente de uvaia (1:10 g mL⁻¹), obtido por imersão em etanol a 70% por 7 dias, inibiu o crescimento de diversos microrganismos, incluindo *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Micrococcus luteus*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus mirabilis*, *Salmonella Typhimurium* e *Enterobacter cloacae*. Os halos de inibição foram de 13,7 mm para *Staphylococcus aureus* e 12 mm para *Salmonella Typhimurium*, impregnando apenas a metade do volume utilizado no presente estudo nos discos (10 µL de extrato) (CHAVASCO et al., 2014). As discrepâncias observadas podem ser atribuídas a variáveis como diferenças nas metodologias de extração e composição química dos extratos, além de fatores como a origem geográfica das plantas, condições de cultivo, maturidade dos frutos na colheita e condições específicas dos ensaios antimicrobianos.

Além da capacidade de estender a vida útil dos produtos alimentícios, a incorporação de compostos fenólicos provenientes de extratos ou micropartículas oferece benefícios adicionais à saúde do consumidor, devido às suas propriedades antioxidantes naturais. Esses compostos apresentam um potencial significativo para o desenvolvimento de conservantes naturais com aplicações relevantes nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética. Na indústria alimentícia, especificamente, extratos antimicrobianos e micropartículas podem ser empregados como aditivos para prolongar a vida útil de produtos como carnes (BALDIN et al., 2016; MITSAGGA; PETROTOS; GIAVASIS, 2021), laticínios (CONCEIÇÃO et al., 2019) e frutas (DE SOUZA et al., 2023). Além disso, extratos naturais podem ser integrados em formulações de filmes ou embalagens, contribuindo para a preservação dos alimentos e a inibição do crescimento de patógenos (DILUCIA et al., 2020; SANTOS et al., 2020).

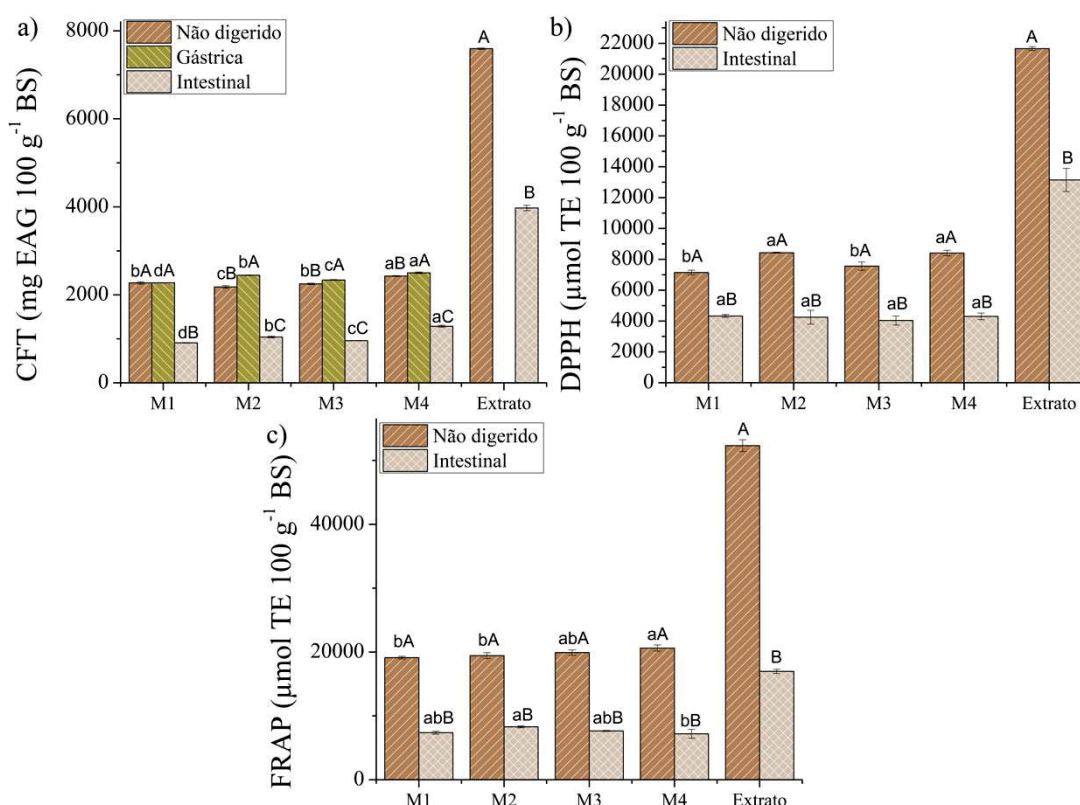
4.5.2.7 Estabilidade de compostos fenólicos durante a digestão gastrointestinal simulada *in vitro*

A simulação da digestão gastrointestinal *in vitro* do extrato e das micropartículas contendo extrato de resíduo de uvaia foi conduzida para reproduzir os fluidos gástricos e intestinais, com o propósito de mimetizar as condições fisiológicas humanas. Este estudo teve como objetivo avaliar a bioacessibilidade e a estabilidade dos compostos fenólicos ao longo das diferentes fases da digestão, proporcionando

informações detalhadas sobre sua disponibilidade potencial para absorção pelo organismo humano.

Os dados apresentados na FIGURA 29 ilustram as variações na concentração média de compostos fenólicos totais nas fases inicial (não digerida), gástrica e intestinal.

FIGURA 29 – SIMULAÇÃO DA DIGESTÃO GASTROINTESTINAL *IN VITRO* DO EXTRATO E DAS MICROPARTÍCULAS DE EXTRATO DE RESÍDUO DE UVAIA LIOFILIZADAS COM DIFERENTES AGENTES ENCAPSULANTES



Formulações: 1) 25% maltodextrina, 2) 12,5% maltodextrina + 12,5% goma arábica, 3) 20% maltodextrina + 5% inulina e 4) 10% maltodextrina + 10% goma arábica + 5% inulina.

Os valores foram expressos em base seca (BS) de micropartículas ou de resíduo de uvaia, no caso do extrato. Média ± desvio padrão (três repetições). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas distinguem entre amostras de micropartículas e letras maiúsculas distinguem entre fases da digestão gastrointestinal da mesma amostra.

Na fase inicial, as micropartículas apresentaram concentrações de compostos fenólicos variando de 2179 ± 30 (formulação 2) a 2428 ± 11 mg EAG 100 g^{-1} de micropartículas (formulação 4). A formulação 4, que contém 10% de maltodextrina, 10% de goma arábica e 5% de inulina, exibiu o maior conteúdo de compostos fenólicos totais, sugerindo que a combinação sinérgica desses agentes encapsulantes pode

oferecer uma proteção aprimorada aos compostos bioativos durante a liofilização, reduzindo perdas potenciais associadas a processos oxidativos.

Na fase gástrica, as micropartículas apresentaram concentrações de compostos fenólicos variando de 2273 ± 5 (formulação 1) a 2500 ± 18 mg EAG 100 g^{-1} de micropartículas (formulação 4), com pouca variação em relação à fase inicial. Algumas formulações demonstraram um leve aumento no conteúdo total de fenólicos. Esse fenômeno durante a fase gástrica pode ser atribuído ao baixo pH e à ação da pepsina, que facilitam a liberação dos compostos fenólicos (DAMIÁN et al., 2022). Além disso, as condições do meio gástrico podem promover modificações nos compostos fenólicos, facilitando a liberação de isômeros ou formas livres, resultando, em alguns casos, em uma maior concentração de fenólicos detectados durante a digestão (SILVA et al., 2024).

Na fase intestinal, por outro lado, observou-se uma redução acentuada no conteúdo fenólico em todas as formulações de micropartículas e no extrato de resíduo de uvaia não microencapsulado, atribuída à degradação enzimática pelas enzimas pancreáticas, à ação dos sais biliares e à alteração do pH (SILVA et al., 2024). Durante o processo digestivo, a hidrólise dos compostos fenólicos em moléculas menores resulta em uma menor estabilidade dessas substâncias em ambientes de pH elevado (FARIAS et al., 2021). A formulação 1 (maltodextrina 25%) apresentou a maior redução, com compostos fenólicos reduzidos para 909 ± 7 mg EAG 100 g^{-1} de micropartículas enquanto a formulação 4 manteve o maior conteúdo residual de 1287 ± 25 mg EAG 100 g^{-1} de micropartículas. O extrato não encapsulado apresentou uma redução de 7596 ± 15 para 3974 ± 60 mg EAG 100 g^{-1} de resíduo liofilizado após a digestão intestinal. Esse comportamento está alinhado com um estudo anterior que investigou extratos de semente e da fração comestível de uvaia (FARIAS et al., 2021). Os autores relataram uma redução de 50% no conteúdo fenólico da semente e de 41% na fração comestível após a digestão intestinal. A análise por mapa de calor realizada indicou uma diminuição na intensidade relativa de todos os ácidos fenólicos em ambas as frações após a digestão.

A bioacessibilidade dos compostos fenólicos foi calculada como a proporção dos compostos fenólicos liberados na fase intestinal em relação ao conteúdo inicial nas amostras não digeridas. A bioacessibilidade das micropartículas variou de 40,02 (formulação 1) a 53,02% (formulação 4). A elevada solubilidade dos materiais de revestimento das micropartículas provavelmente contribuiu para a rápida adsorção do

solvente, intumescimento e ruptura das micropartículas, facilitando a liberação dos compostos de interesse já nas fases oral e gástrica (COELHO et al., 2024). Consequentemente, os compostos fenólicos liberados estariam expostos às condições gástricas e intestinais, resultando em uma fração bioacessível reduzida no intestino. Um comportamento similar foi observado na digestão simulada de microencapsulados da casca de jabuticaba incorporados a uma bebida láctea (COELHO et al., 2024).

É relevante considerar as limitações deste estudo, como o uso do método de Folin-Ciocalteu para a quantificação dos compostos fenólicos, que pode ser suscetível a interferências de outras substâncias redutoras presentes nas formulações. Compostos como proteínas, aminoácidos e açúcares redutores presentes nos agentes encapsulantes podem reagir com o reagente de Folin-Ciocalteu, sendo erroneamente contabilizados como fenóis totais, o que pode impactar a precisão dos resultados (KOTHA et al., 2022). Portanto, a comparação entre os índices de bioacessibilidade das micropartículas pode ser complexa. Além disso, a matriz alimentar na qual os compostos bioativos encapsulados são incorporados desempenha um papel fundamental no sucesso da bioacessibilidade, influenciando diretamente a quantidade de compostos disponíveis para absorção, e, por extensão, sua eficácia no organismo (AYAR-SUMER et al., 2024). A complexidade nutricional de uma matriz alimentar pode induzir interações sinérgicas, aditivas ou de neutralização com compostos bioativos, complicando ainda mais a interpretação dos dados e a avaliação da bioacessibilidade (FARIAS et al., 2021).

No que diz respeito à atividade antioxidante (FIGURA 29b-c), os resultados mostraram que as micropartículas apresentaram atividade antioxidante variando de 7145 ± 149 a 8432 ± 32 $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1}$ pelo método DPPH[•] e de 19116 ± 210 a 20622 ± 483 $\mu\text{mol TEAC } 100 \text{ g}^{-1}$ pelo ensaio FRAP. Observa-se que a relação entre os valores de atividade antioxidante obtidos pelos diferentes ensaios não é direta, uma vez que a contribuição específica de cada composto fenólico para as alterações espectrais é dependente do tipo de ensaio utilizado (MIR-CERDÀ et al., 2023). No entanto, todas as formulações de micropartículas, bem como o extrato não encapsulado, sofreram uma redução significativa na atividade antioxidante após a digestão intestinal, alinhando-se à degradação dos compostos fenólicos observada durante a digestão gastrointestinal. Esses dados indicam que os materiais de

revestimento utilizados não proporcionaram uma proteção suficientemente eficaz dos compostos bioativos ao longo da digestão.

Para elucidar melhor esses achados, recomenda-se que estudos futuros incluam a análise dos compostos bioativos após cada fase da digestão, empregando técnicas analíticas mais avançadas, como CLAE. Esta técnica permite uma quantificação mais precisa e específica dos compostos bioativos, reduzindo as interferências associadas ao método de Folin-Ciocalteu e proporcionando uma avaliação mais detalhada da bioacessibilidade.

Embora a microencapsulação não tenha garantido proteção total dos compostos bioativos do extrato de resíduo de uvaia durante a digestão, observou-se uma entrega significativa desses compostos ao intestino, onde ocorre a maior absorção, possibilitando a expressão de suas propriedades benéficas para a saúde (CASTRO et al., 2024). Além disso, mesmo sem proteção total durante a digestão, a microencapsulação demonstra um elevado potencial para preservar esses compostos durante as etapas de processamento e armazenamento dos produtos. Esta técnica se destaca pela sua eficácia em melhorar a estabilidade dos compostos bioativos, protegendo-os contra condições ambientais adversas, como oxidação, variações de temperatura, umidade e exposição à luz, resultando em uma extensão significativa da vida útil do produto (MAHALAKSHMI; MEGHWAL, 2023).

Além de oferecer proteção e estabilidade, a microencapsulação facilita a incorporação dos compostos bioativos em diversas matrizes alimentares, ampliando seu potencial de aplicação em diferentes tipos de produtos. Essa abordagem também contribui para a otimização dos processos de manuseio, armazenamento e transporte de extratos bioativos. Recomenda-se que estudos futuros explorem esses aspectos com maior profundidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo fornece uma análise abrangente da caracterização e do aproveitamento do resíduo de uvaia, com ênfase nas técnicas de extração e microencapsulação de compostos bioativos. A pesquisa confirma que o resíduo de uvaia é uma fonte significativa de compostos fenólicos, destacando a semente como um alvo promissor para a extração desses bioativos.

Neste contexto, a granulometria é identificada como um fator crítico para a eficácia da extração. Partículas de menor tamanho resultam em maiores concentrações de compostos fenólicos. A liofilização emerge como o método de secagem que melhor preserva a estrutura dos resíduos, o que é fundamental para garantir a qualidade dos extratos obtidos. A formulação hidroetanólica na proporção 50:50 (v/v) demonstra ser o solvente mais eficiente. Comparando os métodos de extração, observa-se que tanto a extração assistida por ultrassom quanto a assistida por ultra-homogeneizador superam a agitação magnética em termos de eficácia. A extração assistida por ultrassom, realizada por 20 min a 50 °C e na proporção 1:10 (g mL⁻¹), alcançou um conteúdo fenólico de 6855 mg EAG 100 g⁻¹ BS. Esse resultado representa um avanço significativo em relação aos estudos anteriores. Os testes de citotoxicidade indicam que o extrato de uvaia possui uma margem de segurança promissora e atividade antitumoral em concentrações mais elevadas. No entanto, são necessários estudos adicionais para validar essas observações preliminares em diferentes contextos biológicos e modelos celulares.

O extrato de resíduo de uvaia contém ácidos fenólicos e flavonoides, como ácido gálico, ácido clorogênico, procianidina e catequina, que apresentam potenciais benefícios para a saúde. Os sistemas de encapsulação com maltodextrina, goma arábica e/ou inulina produzem micropartículas com características desejáveis, como umidade controlada, alta solubilidade, baixa higroscopicidade e resistência térmica. Essas micropartículas também se destacam como corantes naturais atraentes para alimentos e revelam atividade antimicrobiana contra a cepa bacteriana *Staphylococcus aureus*, evidenciando o potencial dos extratos e micropartículas como conservantes naturais eficazes e sustentáveis.

Em síntese, a pesquisa estabelece uma base sólida para a exploração dos resíduos de uvaia como ingredientes inovadores e sustentáveis na indústria alimentícia. Recomenda-se que futuras pesquisas se concentrem na aplicação prática

desses compostos em produtos alimentícios, avaliando aspectos como conservação, características sensoriais e toxicidade, para consolidar seu potencial e promover práticas mais sustentáveis e saudáveis na produção de alimentos.

A valorização do resíduo da uvaia pode contribuir para a economia circular, reduzindo o impacto ambiental e gerando oportunidades de negócios para pequenos produtores. Este estudo pode impulsionar a formação de novas cadeias produtivas, fortalecer a economia local e fomentar o desenvolvimento de produtos de alto valor agregado, com potencial de aplicação em diversos setores, incluindo a indústria alimentícia, cosmética e farmacêutica.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as limitações e possibilidades de aprimoramento do presente estudo, sugere-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- I. Explorar metodologias alternativas de extração de compostos fenólicos a partir do resíduo de uvaia, como a extração assistida por micro-ondas, extração com fluidos supercríticos, extração enzimática e extração assistida por alta pressão;
- II. Avaliar os efeitos da elevação da temperatura além de 50 °C na extração de compostos fenólicos do resíduo, determinando a temperatura máxima viável antes da degradação dos compostos;
- III. Realizar uma análise econômica e energética da extração assistida por ultrassom do resíduo, conforme apresentada neste estudo;
- IV. Desenvolver formulações para a incorporação do extrato de uvaia em produtos alimentícios, farmacêuticos e cosméticos;
- V. Investigar a absorção, distribuição e metabolismo dos compostos bioativos presentes no extrato de uvaia no organismo humano.
- VI. Isolar e identificar os compostos bioativos presentes no extrato de uvaia responsáveis pelos efeitos citotóxicos observados;
- VII. Avaliar outras linhagens celulares de câncer para determinar se o extrato de uvaia exerce efeitos citotóxicos semelhantes;
- VIII. Investigar os mecanismos pelos quais o extrato de resíduo de uvaia exerce seus efeitos citotóxicos;

- IX. Explorar outras potenciais atividades para o extrato de resíduo de uvaia, tais como anti-inflamatória, neuroprotetora e cardioprotetora;
- X. Comparar a eficiência de microencapsulação por *spray drying* e liofilização, analisando as propriedades das micropartículas de extrato de resíduo de uvaia;
- XI. Avaliar a viabilidade das micropartículas como corantes em produtos alimentícios;
- XII. Testar a atividade antimicrobiana das micropartículas e do extrato contra uma gama maior de microrganismos, incluindo fungos e outras cepas bacterianas;
- XIII. Investigar diferentes combinações e concentrações de agentes encapsulantes que possam melhorar a proteção dos compostos fenólicos durante a digestão gastrointestinal;
- XIV. Analisar o impacto das micropartículas em produtos alimentícios quanto à conservação, qualidade sensorial e segurança;
- XV. Investigar a estabilidade das micropartículas e do extrato ao longo do tempo em diferentes condições de armazenamento, como temperatura, luz e umidade;
- XVI. Avaliar a segurança e toxicidade das micropartículas e extratos em alimentos, assegurando a segurança para consumo humano.

REFERÊNCIAS

- ABBASI-PARIZAD, P. *et al.* The recovery from agro-industrial wastes provides different profiles of anti-inflammatory polyphenols for tailored applications. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, 2022.
- AKCICEK, A. *et al.* Influence of different drying techniques on the drying kinetics, total bioactive compounds, anthocyanin profile, color, and microstructural properties of blueberry fruit. **ACS Omega**, v. 8, n. 44, p. 41603–41611, 2023.
- ALARA, O. R.; ABDURAHMAN, N. H.; UKAEGBU, C. I. Extraction of phenolic compounds: a review. **Current Research in Food Science**, v. 4, p. 200–214, 2021.
- ALDAVE, K. P. *et al.* Actividad antimicrobiana *in vitro* del extracto etanólico de camu camu (*Myrciaria dubia*) contra microorganismos bucales. **Diagnóstico**, v. 58, n. 1, p. 23–28, 2019.
- ALU'DATT, M. H. *et al.* Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: a roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients. **Food Bioscience**, v. 50, 2022.
- AMAROWICZ, R.; PEGG, R. B. Natural antioxidants of plant origin. **Advances in Food and Nutrition Research**, v. 90, p. 1–81, 2019.
- AMAYA, M. R. E.; FUENMAYOR, C. A.; CÓRDOBA, A. L. Evaluation of mixtures of maltodextrin and gum arabic for the encapsulation of andean blueberry (*Vaccinium meridionale*) juice by freeze–drying. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 57, n. 11, p. 7379–7390, 2022.
- ANANDHARAMAKRISHNAN, C.; PADMA ISHWARYA, S. **Spray drying techniques for food ingredient encapsulation**. 1. ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2015.
- AOAC. **Official methods of analysis**. 21. ed. Washington D.C.: AOAC International, 2023.
- APAK, R.; CAPANOGLU, E.; SHAHIDI, F. **Measurement of antioxidant activity and capacity: recent trends and applications**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- ASHRAF, A. *et al.* Chemical composition, antioxidant, antitumor, anticancer and cytotoxic effects of *Psidium guajava* leaf extracts. **Pharmaceutical Biology**, v. 54, n. 10, p. 1971–1981, 2016.
- AYAR-SUMER, E. N. *et al.* Optimizing encapsulation of black carrot extract using complex coacervation technique: maximizing the bioaccessibility and release kinetics in different food matrixes. **LWT**, v. 198, 2024.
- BALDIN, J. C. *et al.* Effect of microencapsulated jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract on quality and storage stability of mortadella sausage. **Food Research International**, v. 108, p. 551–557, 2018.

BALDIN, J. C. *et al.* Microencapsulated jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract added to fresh sausage as natural dye with antioxidant and antimicrobial activity. **Meat Science**, v. 118, p. 15–21, 2016.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. *et al.* **Food powders: physical properties, processing, and functionality**. 1. ed. Boston: Springer US, 2005.

BARBOSA, L. C. A. **Espectroscopia no infravermelho: na caracterização de compostos orgânicos**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007.

BARROS, H. D. F. Q. *et al.* Influence of different types of acids and pH in the recovery of bioactive compounds in jabuticaba peel (*Plinia cauliflora*). **Food Research International**, v. 124, p. 16–26, 2019.

BENCHIKH, Y. *et al.* Extraction of phenolic compounds. *In*: INAMUDDIN; ALTALHI, T. (ed.). **Green sustainable process for chemical and environmental engineering and science**. 1. ed. Amesterdã: Elsevier, 2023. p. 329–354.

BENKHAIRA, N.; KORAICHI, S. I.; FIKRI-BENBRAHIM, K. *In vitro* methods to study antioxidant and some biological activities of essential oils: a review. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 12, n. 3, p. 3332–3347, 2022.

BESSA, C. *et al.* Use of polyphenols as modulators of food allergies: from chemistry to biological implications. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 2021.

BRCast-EUCast. **Método de disco-difusão para teste de sensibilidade aos antimicrobianos (versão 12.0)**. 2024.

BRITO, G. O. de *et al.* Phenolic compound profile by UPLC-MS/MS and encapsulation with chitosan of *Spondias mombin* L. fruit peel extract from cerrado hotspot—Brazil. **Molecules**, v. 27, n. 8, p. 2382, 2022.

BRODKORB, A. *et al.* INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion. **Nature Protocols**, v. 14, n. 4, p. 991–1014, 2019.

BURNSIDE, E. Hydrocolloids and gums as encapsulating agents. *In*: GAONKAR, A. G. *et al.* (ed.). **Microencapsulation in the food industry: a practical implementation guide**. 1. ed. Cambridge: Academic Press, 2014.

CANO-CHAUCA, M. *et al.* Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 6, n. 4, p. 420–428, 2005.

CARITÁ, A. C. *et al.* Vitamin C: one compound, several uses: advances for delivery, efficiency and stability. **Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine**, v. 24, 2020.

CASATI, C. B.; BAEZA, R.; SÁNCHEZ, V. Physicochemical properties and bioactive compounds content in encapsulated freeze-dried powders obtained from blueberry, elderberry, blackcurrant and maqui berry. **Journal of Berry Research**, v. 9, n. 3, p. 431–447, 2019.

CASTAÑEDA-VALBUENA, D. *et al.* Ultrasound extraction conditions effect on antioxidant capacity of mango by-product extracts. **Food and Bioproducts Processing**, v. 127, p. 212–224, 2021.

CASTELUCCI, A. C. L. *et al.* Bioactive compounds and *in vitro* antioxidant activity of pulps from fruits from the Brazilian Atlantic forest. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 42, n. 1, 2020.

CASTRO, L. E. N. *et al.* Application of functional compounds from agro-industrial residues of Brazilian's tropical fruits extracted by sustainable methods in alginate-chitosan microparticles. **Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre**, v. 32, p. 100441, 2024.

CHANDRASEKARAN, M.; VENKATESALU, V. Antibacterial and antifungal activity of *Syzygium jambolanum* seeds. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 91, n. 1, p. 105–108, 2004.

CHANG, Y. *et al.* Valorization of food processing waste to produce valuable polyphenolics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 70, n. 29, p. 8855–8870, 2022.

CHAVASCO, J. M. *et al.* Evaluation of antimicrobial and cytotoxic activities of plant extracts from southern Minas Gerais cerrado. **Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo**, v. 56, n. 1, p. 13–20, 2014.

CHETRARIU, A.; DABIJA, A. Spent grain from malt whisky: assessment of the phenolic compounds. **Molecules**, v. 26, n. 11, p. 3236, 2021.

CHOUDHURY, N.; MEGHWAL, M.; DAS, K. Microencapsulation: an overview on concepts, methods, properties and applications in foods. **Food Frontiers**, v. 2, n. 4, p. 426–442, 2021.

CHRISTODOULOU, M. C. *et al.* Spectrophotometric methods for measurement of antioxidant activity in food and pharmaceuticals. **Antioxidants**, v. 11, n. 11, p. 2213, 2022.

COELHO, V. S. *et al.* Incorporation of microencapsulated polyphenols from jaboticaba peel (*Plinia spp.*) into a dairy drink: stability, in vitro bioaccessibility, and glycemic response. **Food Research International**, v. 189, n. May, p. 114567, 2024.

CONCEIÇÃO, N. *et al.* By-products of camu-Camu [*Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh] as promising sources of bioactive high added-value food ingredients: functionalization of yogurts. **Molecules**, v. 25, n. 1, p. 70, 2019.

CORRÊA-FILHO, L.; MOLDÃO-MARTINS, M.; ALVES, V. Advances in the application of microcapsules as carriers of functional compounds for food products. **Applied Sciences**, v. 9, n. 3, p. 571, 2019.

CUNHA-SANTOS, E. C. E. *et al.* Optimization of phenolic compounds extraction of different parts of camu-camu fruit from different geographic regions. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 77, n. 3, p. 340–344, 2022.

- DA ROCHA, C. B.; NOREÑA, C. P. Z. Microencapsulation and controlled release of bioactive compounds from grape pomace. **Drying Technology**, v. 39, n. 8, p. 1018–1032, 2021.
- DA SILVA, A. P. G. *et al.* Characteristics of the fruits of two uvaia populations grown in Salesópolis, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 2, 2018.
- DA SILVA, A. P. G. *et al.* Chemical composition, bioactive compounds, and perspectives for the industrial formulation of health products from uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess – Myrtaceae): a comprehensive review. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 109, 2022.
- DA SILVA, A. P. G. *et al.* Chemical composition, nutritional value and bioactive compounds in six uvaia accessions. **Food Chemistry**, v. 294, p. 547–556, 2019.
- DA SILVA, A. P.G. *et al.* Postharvest storage of two accessions of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) at room temperature. **Acta Horticulturae**, v. 1194, n. 1194, p. 959–964, 2018.
- DACOREGGIO, M. V. *et al.* A comprehensive review of *Eugenia pyriformis* Cambess: reported bioactivities and health effects. **Food Reviews International**, v. 39, n. 5, p. 2477–2491, 2023.
- DAMIÁN, M. R. *et al.* Microencapsulation of red banana peel extract and bioaccessibility assessment by *in vitro* digestion. **Processes**, v. 10, n. 4, p. 768, 2022.
- DANIELSKI, R. *et al.* A non-conventional approach for obtaining phenolic antioxidants from red guava (*Psidium guajava* L.) by-products. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 6, 2022.
- DE ARAÚJO, F. F. *et al.* Wild Brazilian species of *Eugenia* genera (Myrtaceae) as an innovation hotspot for food and pharmacological purposes. **Food Research International**, v. 121, p. 57–72, 2019.
- DE AVELAR, M. H. M. *et al.* A byproduct of uvaia (*Eugenia pyriformis*) processing as a natural source for coloring sugar hard-panning confections. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 7, p. e13250, 2019.
- DE SOUZA, P. G. *et al.* Natural extracts from *Eugenia brasiliensis* Lam leaves to improve the shelf-life of fresh tomatoes. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, n. 4, p. 1293–1304, 2023.
- DÍAZ-MONTES, E. Wall materials for encapsulating bioactive compounds via spray-drying: a review. **Polymers**, v. 15, n. 12, p. 2659, 2023.
- DILUCIA, F. *et al.* Sustainable use of fruit and vegetable by-products to enhance food packaging performance. **Foods**, v. 9, n. 7, p. 857, 2020.
- DOS SANTOS, L. R. L. F. *et al.* Brazilian native fruit pomace as a source of bioactive compounds on starch-based films: antimicrobial activities and food simulator release. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, 2023.

EGEA, M. B.; PEREIRA-NETTO, A. B. Bioactive compound-rich, virtually unknown, edible fruits from the Atlantic Rainforest: changes in antioxidant activity and related bioactive compounds during ripening. **European Food Research and Technology**, v. 245, n. 5, p. 1081–1093, 2019.

EGGERSDORFER, M.; WYSS, A. Carotenoids in human nutrition and health. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 652, p. 18–26, 2018.

ELSEBAIE, E. M.; ESSA, R. Y. Microencapsulation of red onion peel polyphenols fractions by freeze drying technicality and its application in cake. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 7, p. e13654, 2018.

ETGETON, S. A. P. *et al.* Nutritional composition, simulated digestion and biological activities of *Campomanesia xanthocarpa* fruit. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 79, n. 1, p. 59–65, 2024.

FARIA, W. C. S. *et al.* Design and evaluation of microencapsulated systems containing extract of whole green coffee fruit rich in phenolic acids. **Food Hydrocolloids**, v. 100, p. 105437, 2020.

FARIAS, D. D. P. *et al.* A critical review of some fruit trees from the Myrtaceae family as promising sources for food applications with functional claims. **Food Chemistry**, v. 306, p. 125630, 2020a.

FARIAS, D. D. P. *et al.* Distribution of nutrients and functional potential in fractions of *Eugenia pyriformis*: an underutilized native Brazilian fruit. **Food Research International**, v. 137, p. 109522, 2020b.

FARIAS, D. D. P. *et al.* Effect of in vitro digestion on the bioaccessibility and bioactivity of phenolic compounds in fractions of *Eugenia pyriformis* fruit. **Food Research International**, v. 150, p. 110767, 2021.

FERREIRA, I. C. F. R.; MARTINS, N.; BARROS, L. Phenolic compounds and its bioavailability: *in vitro* bioactive compounds or health promoters? In: TOLDRÁ, F. (ed.). **Advances in food and nutrition research**. 1. ed. Cambridge: Academic Press, 2017. v. 82, p. 1–44.

FIDELIS, M. *et al.* Camu-camu seed (*Myrciaria dubia*) – from side stream to an antioxidant, antihyperglycemic, antiproliferative, antimicrobial, antihemolytic, anti-inflammatory, and antihypertensive ingredient. **Food Chemistry**, v. 310, 2020a.

FIDELIS, M. *et al.* Response surface optimization of phenolic compounds from jaboticaba (*Myrciaria cauliflora* [Mart.] O.Berg) seeds: antioxidant, antimicrobial, antihyperglycemic, antihypertensive and cytotoxic assessments. **Food and Chemical Toxicology**, v. 142, 2020b.

FIGUEIREDO, J. de A. *et al.* Encapsulation of camu-camu extracts using prebiotic biopolymers: controlled release of bioactive compounds and effect on their physicochemical and thermal properties. **Food Research International**, v. 137, 2020.

FREITAS, T. P. *et al.* Aroma and soluble solid contents of the uvaia—a native

Atlantic rainforest fruit—are negatively affected by early harvest. **Journal of Food Biochemistry**, v. 43, n. 7, 2019.

FUENTES, Y. *et al.* Microencapsulation of chilean papaya waste extract and its impact on physicochemical and bioactive properties. **Antioxidants**, v. 12, n. 10, p. 1900, 2023.

GARCÍA-CHACÓN, J. M. *et al.* Characterization and bioaccessibility assessment of bioactive compounds from camu-camu (*Myrciaria dubia*) powders and their food applications. **Food Research International**, v. 176, p. 113820, 2024.

GIL-MARTÍN, E. *et al.* Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products. **Food Chemistry**, v. 378, p. 131918, 2022.

GOMES, B. de O. *et al.* Uvaia fruit (*Eugenia pyriformis* Cambess) drying: ethanol as pre-treatment, convective drying kinetics and bioactive compounds. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 2, p. e16284, 2022.

GOUVÊA, F. de J. *et al.* Natural antioxidants as strategy to minimize the presence of lipid oxidation products in canned fish: research progress, current trends and future perspectives. **Food Research International**, v. 173, 2023.

GUEDES, J. S. *et al.* Physicochemical and functional properties of a novel starch from uvaia (*Eugenia pyriformis*) seed, a native fruit from Brazil. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 10, 2021.

HACKE, A. C. M. *et al.* Jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) seeds: chemical characterization and extraction of antioxidant and antimicrobial compounds. **Journal of food science**, v. 81, n. 9, p. 2206–2217, 2016.

HALAHLAH, A. *et al.* Polysaccharides as wall materials in spray-dried microencapsulation of bioactive compounds: physicochemical properties and characterization. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 24, p. 6983–7015, 2023.

HALL, A. M. *et al.* Investigation of the chemical composition of antibacterial Psidium guajava extract and partitions against foodborne pathogens. **Food Chemistry**, v. 403, p. 134400, 2023.

HOSSEINI, H.; JAFARI, S. M. Introducing nano/microencapsulated bioactive ingredients for extending the shelf-life of food products. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 282, 2020.

HUA, T. C.; LIU, B. L.; ZHANG, H. **Freeze-Drying of Pharmaceutical and Food Products**. 1. ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2010.

HUANG, K.; YUAN, Y.; BAOJUN, X. A critical review on the microencapsulation of bioactive compounds and their application. **Food Reviews International**, v. 39, n. 5, p. 2594–2634, 2023.

HURKUL, M. M. *et al.* Investigation of health effects of major phenolic compounds in

foods: extraction processes, analytical approaches and applications. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, p. 1–35, 2024.

IAL. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 1. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

ISLAM, M. *et al.* Impact of different drying techniques on grapefruit peels and subsequent optimization of ultrasonic extraction conditions for bioactive compounds. **Journal of Food Process Engineering**, v. 46, n. 6, 2023.

ISSURIYA, A. *et al.* Potential applications of *Rhodomyrtus tomentosa* leaf extract as natural anti-staphylococcal additive in food systems: efficacy and in vivo safety evaluation. **Food Science and Technology International**, v. 30, n. 4, p. 370–383, 2024.

JACOMINO, A. P. *et al.* Uvaia—*Eugenia pyriformis* Cambess. In: RODRIGUES, S.; SILVA, E. de O.; DE BRITO, E. S. (ed.). **Exotic fruits reference guide**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 435–438.

JAFARI, S. *et al.* A decade overview and prospect of spray drying encapsulation of bioactives from fruit products: characterization, food application and *in vitro* gastrointestinal digestion. **Food Hydrocolloids**, v. 134, p. 108068, 2023a.

JAFARI, S. *et al.* Ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from cocoa shell and their encapsulation in gum arabic and maltodextrin: a technology to produce functional food ingredients. **Foods**, v. 12, n. 2, p. 412, 2023b.

KIM, S. *et al.* PubChem 2023 update. **Nucleic Acids Research**, v. 51, n. D1, p. D1373–D1380, 2023.

KOBO, G. K.; KASEKE, T.; FAWOLE, O. A. Micro-encapsulation of phytochemicals in passion fruit peel waste generated on an organic farm: effect of carriers on the quality of encapsulated powders and potential for value-addition. **Antioxidants**, v. 11, n. 8, p. 1579, 2022.

KONARÉ, M. A. *et al.* Valorization of bioactive compounds from two underutilized wild fruits by microencapsulation in order to formulate value-added food products. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 267, 2023.

KOOP, B. L. *et al.* Flavonoids, anthocyanins, betalains, curcumin, and carotenoids: sources, classification and enhanced stabilization by encapsulation and adsorption. **Food Research International**, v. 153, 2022.

KOTHA, R. R. *et al.* Oxidative stress and antioxidants: a critical review on *in vitro* antioxidant assays. **Antioxidants**, v. 11, n. 12, p. 2388, 2022.

KUCK, L. S.; NOREÑA, C. P. Z. Microencapsulation of grape (*Vitis labrusca* var. Bordo) skin phenolic extract using gum arabic, polydextrose, and partially hydrolyzed guar gum as encapsulating agents. **Food Chemistry**, v. 194, p. 569–576, 2016.

KWAK, H. S. **Nano- and microencapsulation for foods**. 1. ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2014.

- LARRAURI, J. A.; RUPÉREZ, P.; SAURA-CALIXTO, F. Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peels. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 45, n. 4, p. 1390–1393, 1997.
- LAUREANTI, E. J. G. *et al.* Microencapsulation of bioactive compound extracts using maltodextrin and gum arabic by spray and freeze-drying techniques. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 253, p. 126969, 2023.
- LOBIUC, A. *et al.* Future antimicrobials: natural and functionalized phenolics. **Molecules**, v. 28, n. 3, p. 1114, 2023.
- LOPES, J. M. M. *et al.* A preliminary exploration of the potential of *Eugenia uvalha* Cambess juice intake to counter oxidative stress. **Food Research International**, v. 105, p. 563–569, 2018.
- LOSADA-BARREIRO, S. *et al.* Biochemistry of antioxidants: mechanisms and pharmaceutical applications. **Biomedicines**, v. 10, n. 12, p. 3051, 2022.
- LOURENÇO, S. C.; MOLDÃO-MARTINS, M.; ALVES, V. D. Microencapsulation of pineapple peel extract by spray drying using maltodextrin, inulin, and arabic gum as wall matrices. **Foods**, v. 9, n. 6, p. 718, 2020.
- LU, W. *et al.* Choosing the appropriate wall materials for spray-drying microencapsulation of natural bioactive ingredients: taking phenolic compounds as examples. **Powder Technology**, v. 394, p. 562–574, 2021.
- MACHADO, G. H. A. *et al.* Antibacterial activity and in vivo wound healing potential of phenolic extracts from jaboticaba skin. **Chemical Biology & Drug Design**, v. 92, n. 1, p. 1333–1343, 2018.
- MAHALAKSHMI, M.; MEGHWAL, M. Microencapsulation of fruit juices: techniques, properties, application of fruit powder. **Journal of Food Process Engineering**, v. 46, n. 2, 2023.
- MALI, P. S.; KUMAR, P. Simulation and experimentation on parameters influencing microwave-assisted extraction of bioactive compounds from *Punica granatum* waste and its preliminary analysis. **Food Chemistry Advances**, v. 3, p. 100344, 2023.
- MAR, J. M. *et al.* Bioactive compounds-rich powders: Influence of different carriers and drying techniques on the chemical stability of the *Hibiscus acetosella* extract. **Powder Technology**, v. 360, p. 383–391, 2020.
- MARK, R. *et al.* Sustainable production of natural phenolics for functional food applications. **Journal of Functional Foods**, v. 57, p. 233–254, 2019.
- MARTINOVIĆ, J. *et al.* Microencapsulation of grape pomace extracts with alginate-based coatings by freeze-drying: release kinetics and *in vitro* bioaccessibility assessment of phenolic compounds. **Gels**, v. 10, n. 6, p. 353, 2024.
- MARTINS, V. F. R. *et al.* Valorisation of micro/nanoencapsulated bioactive compounds from plant sources for food applications towards sustainability. **Foods**, v. 12, n. 1, p. 32, 2022.

MAVANZA, S.; OMWENGA, G.; NGUGI, M. Antibacterial and phytochemical effects of ethanol extracts of *Syzygium guineense* (Willd.) DC barks and *Mangifera indica* L seeds. **Journal of Advanced Biotechnology and Experimental Therapeutics**, v. 6, n. 2, p. 337, 2023.

MAZUCO, R. A. *et al.* Maltodextrin and gum arabic-based microencapsulation methods for anthocyanin preservation in juçara palm (*Euterpe edulis* Martius) fruit pulp. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 73, n. 3, p. 209–215, 2018.

MEDEIROS, J. P. *et al.* Biocidal potential of *Eugenia pyriformis* essential oil in the control of *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in the free-living cycle. **Pesquisa Veterinaria Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 879–888, 2019.

MEHTA, N. *et al.* Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry: a comprehensive review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1424, 2022.

MEREGALLI, M. M. *et al.* Conventional and ultrasound-assisted methods for extraction of bioactive compounds from red araçá peel (*Psidium cattleianum* Sabine). **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 6, p. 5800–5809, 2020.

MIR-CERDÀ, A. *et al.* An overview of the extraction and characterization of bioactive phenolic compounds from agri-food waste within the framework of circular bioeconomy. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 161, p. 116994, 2023.

MITSAGGA, C.; PETROTOS, K.; GIAVASIS, I. Antimicrobial properties of lyophilized extracts of olive fruit, pomegranate and orange peel extracts against foodborne pathogenic and spoilage bacteria and fungi *in vitro* and in food matrices. **Molecules**, v. 26, n. 22, p. 7038, 2021.

MONTENEGRO-LANDÍVAR, M. F. *et al.* Fruit and vegetable processing wastes as natural sources of antioxidant-rich extracts: evaluation of advanced extraction technologies by surface response methodology. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105330, 2021.

MOSMANN, T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays. **Journal of Immunological Methods**, v. 65, n. 1–2, p. 55–63, 1983.

MOTA, J. C. *et al.* Far from being a simple question: the complexity between in vitro and in vivo responses from nutrients and bioactive compounds with antioxidant potential. **Food Chemistry**, v. 402, p. 134351, 2023.

MUHOZA, B. *et al.* Spray-and freeze-drying of microcapsules prepared by complex coacervation method: a review. **Food Hydrocolloids**, v. 140, p. 108650, 2023.

MUNEKATA, P. E. S. *et al.* Bioactive compounds from fruits as preservatives. **Foods**, v. 12, n. 2, p. 343, 2023.

MUNIN, A.; EDWARDS-LÉVY, F. Encapsulation of natural polyphenolic compounds: a review. **Pharmaceutics**, v. 3, n. 4, p. 793–829, 2011.

MUSTAFA, A.; TURNER, C. Pressurized liquid extraction as a green approach in food and herbal plants extraction: a review. **Analytica Chimica Acta**, v. 703, n. 1, p. 8–18, 2011.

NAIK, A. S. *et al.* Ultrasonic treatment: a cohort review on bioactive compounds, allergens and physico-chemical properties of food. **Current Research in Food Science**, v. 4, p. 470–477, 2021.

NGUYEN, V. T. **Recovering Bioactive Compounds from Agricultural Wastes**. 1. ed. Hoboken: Wiley, 2017.

OXLEY, J. Overview of microencapsulation process technologies. *In*: SOBEL, R. (ed.). **Microencapsulation in the food industry: a practical implementation guide**. 2. ed. Cambridge: Academic Press, 2014. p. 35–46.

OZKAN, G. *et al.* A review of microencapsulation methods for food antioxidants: principles, advantages, drawbacks and applications. **Food Chemistry**, v. 272, p. 494–506, 2019.

PATRA, A.; ABDULLAH, S.; PRADHAN, R. C. Review on the extraction of bioactive compounds and characterization of fruit industry by-products. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 9, n. 1, p. 14, 2022.

PAVLOVIĆ, R. Ž. *et al.* Phenolic compounds from sour cherry pomace: microencapsulation, *in vitro* digestion, and cell growth activities. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 78, n. 1, p. 221–227, 2023.

PRABHU, S.; VAIDEKI, K.; ANITHA, S. Effect of microwave argon plasma on the glycosidic and hydrogen bonding system of cotton cellulose. **Carbohydrate Polymers**, v. 156, p. 34–44, 2017.

PROCOPET, O.; OROIAN, M. Amaranth seed polyphenol, fatty acid and amino acid profile. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 4, p. 2181, 2022.

RAHAIEE, S. *et al.* Application of nano/microencapsulated phenolic compounds against cancer. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 279, p. 102153, 2020.

RAMIREZ, M. R. *et al.* Evaluation of the polyphenolic content, anti-inflammatory and antioxidant activities of total extract from *Eugenia pyriformis* Cambess (uvaia) fruits. **Journal of Food Biochemistry**, v. 36, n. 4, p. 405–412, 2012.

RAMOS, K. K. *et al.* Mathematical modeling of uvaia byproduct drying and evaluation of quality parameters. **Food Science and Biotechnology**, v. 26, n. 3, p. 643–651, 2017.

RODRIGUES, L. M. *et al.* Jaboticaba byproduct encapsulation by lyophilization: pH and food application stability. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, n. 1, p. e12639, 2018a.

RODRIGUES, L. M. *et al.* Microcapsules of jaboticaba byproduct: storage stability and application in gelatin. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**,

v. 22, n. 6, p. 424–429, 2018b.

RODRIGUES, L. M. *et al.* Uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) residue as a source of antioxidants: an approach to ecofriendly extraction. **Lwt**, v. 138, p. 110785, 2021.

RODRIGUEZ-CONCEPCION, M. *et al.* A global perspective on carotenoids: metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health. **Progress in Lipid Research**, v. 70, p. 62–93, 2018.

ROSÁRIO, F. M. *et al.* Red araçá pulp microencapsulation by hydrolyzed pinhão starch, and tara and arabic gums. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 5, p. 2052–2062, 2021.

RUDRAPAL, M. *et al.* Dietary polyphenols and their role in oxidative stress-induced human diseases: insights into protective effects, antioxidant potentials and mechanism(s) of action. **Frontiers in Pharmacology**, v. 13, p. 806470, 2022.

RUFINO, M. do S. M. *et al.* Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 non-traditional tropical fruits from Brazil. **Food Chemistry**, v. 121, n. 4, p. 996–1002, 2010.

RUFINO, M. do S. M. *et al.* Determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre ABTS. **Comunicado Técnico Online EMBRAPA**, v. 128, p. 0–3, 2007a.

RUFINO, M. do S. M. *et al.* Determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre DPPH. **Comunicado Técnico Online EMBRAPA**, v. 127, p. 1–4, 2007b. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/426953>.

RUFINO, M. do S. M. *et al.* Determinação da atividade antioxidante total em frutas pelo método de redução do ferro (FRAP). **Comunicado Técnico Online EMBRAPA**, v. 125, p. 3–6, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/664098>.

RUFINO, M. S. M. *et al.* Total phenolic content and antioxidant activity in acerola, açaí, mangaba and uvaia fruits by DPPH method. **Acta Horticulturae**, n. 841, p. 459–462, 2009.

RUSKOVSKA, T.; MAKSIMOVA, V.; MILENKOVIC, D. Polyphenols in human nutrition: from the in vitro antioxidant capacity to the beneficial effects on cardiometabolic health and related inter-individual variability – an overview and perspective. **British Journal of Nutrition**, v. 123, n. 3, p. 241–254, 2020.

SAAH, S. *et al.* Physicochemical and biological properties of encapsulated *Boesenbergia rotunda* extract with different wall materials in enhancing antioxidant, mineralogenic and osteogenic activities of MC3T3-E1 cells. **Saudi Pharmaceutical Journal**, v. 32, n. 4, 2024.

SALAZAR, M. de los Á. R. *et al.* Antioxidants extraction from vegetable matrices with green solvents. In: INAMUDDIN; TARIQ, A. (ed.). **Green sustainable process for chemical and environmental engineering and science**. 1. ed. Amesterdã:

Elsevier, 2023. p. 289–308.

SANTANA, Á. L.; ZANINI, J. A.; MACEDO, G. A. Dispersion-assisted extraction of guarana processing wastes on the obtaining of polyphenols and alkaloids. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 4, 2020.

SANTOS-BUELGA, C. *et al.* Plant phenolics as functional food ingredients. *In*: TROLDA, F. (ed.). **Advances in food and nutrition research**. 1. ed. San Diego: Academic Press, 2019. v. 90, p. 183–257.

SANTOS, C. A. *et al.* Bioactive properties of *Syzygium cumini* (L.) skeels pulp and seed phenolic extracts. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 990, 2020.

SCHANDA, J. **Colorimetry: understanding the CIE system**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

SCHMIDT, H. de O. *et al.* Vitamin and bioactive compound diversity of seven fruit species from south Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 99, n. 7, p. 3307–3317, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsfa.9544>.

SGANZERLA, W. G. *et al.* Geographical discrimination of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) by principal component analysis. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 15, p. 6778–6787, 2019.

SGANZERLA, W. G. *et al.* Variability in the molecular, phenological, and physicochemical characteristics of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess - Myrtaceae) accessions from the Brazilian Atlantic rainforest. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 35, p. 102082, 2021.

SGANZERLA, W. G.; DA SILVA, A. P. G. Uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess – Myrtaceae): an overview from the origin to recent developments in the food industry – a bibliometric analysis. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, 2022.

SHENOY, N. *et al.* Drugs with anti-oxidant properties can interfere with cell viability measurements by assays that rely on the reducing property of viable cells. **Laboratory Investigation**, v. 97, n. 5, p. 494–497, 2017.

SHEWALE, S. P.; KAPADIA, M.; RATHOD, V. K. Intensification of total phenolic compounds extraction from *Azadirachta indica* (Neem) leaves by ultrasound. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 181, p. 109099, 2022.

SHI, L. *et al.* Extraction and characterization of phenolic compounds and their potential antioxidant activities. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 54, p. 81112–81129, 2022.

SILVA, G. S. *et al.* Microencapsulation of organic coffee husk polyphenols: Effects on release, bioaccessibility, and antioxidant capacity of phenolics in a simulated gastrointestinal tract. **Food Chemistry**, v. 434, 2024.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. **Spectrometric identification**

of organic compounds. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2005.

SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *In*: PACKER, L. (ed.). **Methods in Enzymology**. Cambridge: Academic Press, 1999. v. 299, p. 152–178.

SUOTA, M. J. *et al.* Chemical and structural characterization of hardwood and softwood LignoForce™ lignins. **Industrial Crops and Products**, v. 173, p. 114138, 2021.

TANGARIFE, D. P. C.; ARIAS, L. P. P.; ZAPATA, A. M. O. Aspectos tecnológicos de la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos mediante secado por aspersión. **Ciencia & Tecnología Agropecuaria**, v. 22, n. 1, p. 1–21, 2021.

TAVER, I. B. *et al.* Bioactive compounds and in vitro antioxidant capacity of cambuci and uvaia: an extensive description of little-known fruits from the Myrtaceae family with high consumption potential. **Foods**, v. 11, n. 17, p. 2612, 2022.

TIWARI, B. K. Ultrasound: a clean, green extraction technology. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 71, p. 100–109, 2015.

TOAZZA, C. E. B. *et al.* Bioactive compounds extraction from different lemongrass species: strategies and deep eutectic solvents evaluation. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 5, 2022.

TONON, R. V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 3, p. 411–418, 2008.

TUNCEL, N. B.; YILMAZ, N. Optimizing the extraction of phenolics and antioxidants from feijoa (*Feijoa sellowiana*, Myrtaceae). **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 1, p. 141–150, 2015.

VUOLO, M. M.; LIMA, V. S.; MARÓSTICA, M. R. Phenolic Compounds. *In*: CAMPOS, M. R. S. (ed.). **Bioactive Compounds**. 1. ed. Sawston: Woodhead Publishing, 2019. p. 33–50.

XU, W.-J. *et al.* Ultra-turrax based ultrasound-assisted extraction of five organic acids from honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) and optimization of extraction process. **Separation and Purification Technology**, v. 166, p. 73–82, 2016.

YAMASHITA, C. *et al.* Microencapsulation of an anthocyanin-rich blackberry (*Rubus spp.*) by-product extract by freeze-drying. **LWT**, v. 84, p. 256–262, 2017.

YANG, L.; ZHANG, L.-M. Chemical structural and chain conformational characterization of some bioactive polysaccharides isolated from natural sources. **Carbohydrate Polymers**, v. 76, n. 3, p. 349–361, 2009.

ZEB, A. Concept, mechanism, and applications of phenolic antioxidants in foods. **Journal of Food Biochemistry**, v. 44, n. 9, 2020.

ANEXO 1 – ARTIGO PUBLICADO NA *INTERNATIONAL JOURNAL OF FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY* (<https://doi.org/10.1111/ijfs.17342>)

Unlocking the Potential of Uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess): Exploring its Rich Chemical Composition and Varied Biological Activities for Innovations in the Food Industry

Mariana Aguiar Cargnin¹, Katia Rezzadori², Isabela de Andrade Arruda Fernandes¹, Charles Windson Isidoro Haminiuk³, Franciny Campos Schmidt^{1,*}

¹Department of Chemical Engineering, Polytechnic Center, Federal University of Paraná (UFPR), Curitiba, PR, 81531-990, Brazil.

²Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences Center, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 88034-001, Brazil.

³Biotechnology Laboratory, Academic Department of Chemical and Biology, Federal Technological University of Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, 81280-340, Brazil

***Corresponding author**

E-mail: francinyschmidt@gmail.com

ABSTRACT: *Eugenia pyriformis* Cambess (uvaia), a native species of the Atlantic Forest ecosystem, has received limited attention in scientific investigations. Renowned for its distinctive organoleptic characteristics, this fruit is suitable for immediate consumption and industrial processing. Additionally, it is rich in vitamins and bioactive compounds, which offer potential health benefits. These bioactive compounds, such as ascorbic acid, carotenoids, and phenolic compounds, have demonstrated antioxidant and antimicrobial properties in both *in vitro* and *in vivo* studies. This review consolidates recent research on uvaia, focusing on its chemical composition, biological activities, and potential applications within the food industry. It aims to lay the groundwork for future research and promote its recognition and utilisation in food production.

Keywords: Ascorbic acid; Carotenoids; Phenolic compounds; Biological activities; extraction.

1. Introduction

Eugenia pyriformis Cambess, commonly known as uvaia, is a distinctive fruit belonging to the Myrtaceae family and endemic to the Atlantic Forest, predominantly found between São Paulo and Rio Grande do Sul, Brazil (Rodrigues *et al.*, 2021a). Uvaia stands out for its diverse shapes and colours, ranging from round to pear-shaped varieties (Spricigo *et al.*, 2023) and a spectrum of hues from light yellow to deep orange (Sganzerla and da Silva, 2022). These fruits not only offer unique flavours and aromas but also possess a beneficial chemical composition, making them highly promising for the food industry (Castelucci *et al.*, 2020). Despite their nutritional and sensory attributes, their seasonal availability and limited shelf-life constrain their commercial utilisation, primarily limiting consumption to their native regions (Freitas *et al.*, 2019). However, uvaia shows promise for commercialisation in various products, including juices, jams, ice creams, liqueurs, yoghurts, and candies (Freitas *et al.*, 2019).

The rich content of bioactive compounds found in fruits of the Myrtaceae family, especially those belonging to the *Eugenia* species, further underscores their potential health benefits (Egea and Pereira-Netto, 2019; Schmidt *et al.*, 2019; Bianchini *et al.*, 2020; Castelucci *et al.*, 2020). These compounds have been linked to the prevention and management of chronic conditions such as cancer, diabetes, obesity, and cardiovascular diseases (Farias *et al.*, 2020b).

This review explores uvaia, covering its origin, botanical characteristics, harvest times, chemical composition, and the biological activities of its bioactive compounds. Recent advancements in the conservation and processing of the fruit and the formulation of derived products are discussed. This comprehensive examination provides valuable support for future research and offers insights for food manufacturers and stakeholders interested in exploring and promoting this indigenous Brazilian species.

2. Origin, botanical aspects, and harvest season

Uvaia, also known as "uvalha," "ubaia," "uvaia do mato," "uvaieira," "uvalheira," or "azedinha" (Sganzerla and da Silva, 2022), derives its name from the Tupi language, meaning "sour fruit" (Lopes *et al.*, 2018). Originating from the Atlantic Forest, the uvaia is widely distributed throughout the south, southeast, and northeast of Brazil, with occurrences also recorded in the central west (Jacomino *et al.*, 2018), as well as

being found in neighbouring countries such as Argentina and Paraguay (Dacoreggio *et al.*, 2021). Its primary adaptation occurs in high-altitude areas (Sganzerla and da Silva, 2022). Uvaia is commonly found in gardens and home orchards, particularly in the country's southeast region of Brazil (Jacomino *et al.*, 2018).

The uvaia tree typically reaches 6 to 12 meters and is characterised by an upright trunk and a distinct canopy (Jacomino *et al.*, 2018). Its leaves, arranged in an opposite phyllotaxis pattern, measure 4 to 7 cm long and lack trichomes (Jacomino *et al.*, 2018; Medeiros *et al.*, 2019). Uvaia flowers are white, solitary, hermaphroditic, and exhibit tetramer symmetry with numerous stamens (Farias *et al.*, 2020b). The fruits have an average height ranging from 16.21 to 32.62 mm, a diameter between 19.51 and 41.17 mm, and the pulp-to-skin and seed yield varies from 61.95 to 89.95% (Spricigo *et al.*, 2023). The fruit possesses a delicate peel, necessitating careful handling, especially during transportation and storage (Jacomino *et al.*, 2018). Each uvaia fruit contains one to four seeds with high germination capacity (da Silva *et al.*, 2022). Fig. S1a-c illustrates the morphology of the uvaia tree (a), its fruits (b), and seeds (c).

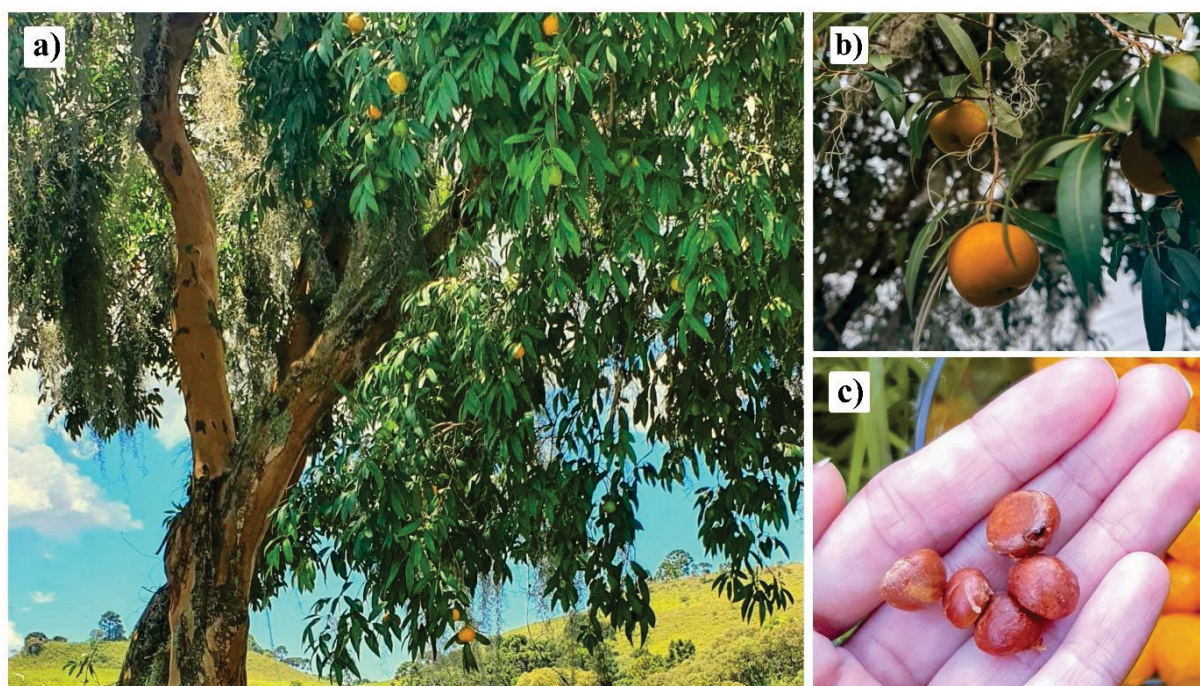


Fig. S1 Overview of *Eugenia pyriformis* Cambess species (A), mature fruits collected (B), and seeds (C).

Considerable variability exists among native uvaia populations regarding flowering onset and fruit maturation (Sganzerla *et al.*, 2021). In Brazil, flowering of the uvaia

tree occurs from August to September in São Paulo, extending until February in the southern region and observed until November in the Pantanal region (Sganzerla *et al.*, 2021). Furthermore, various uvaia accessions, including "Comum," "Bolívia," "Rugosa," "Doce de Patos de Minas," "Pêra," "Rugosa Doce," and "Doce," showcase unique chemical compositions, bioactive compounds, and antioxidant capacities in their fruits (Jacomino *et al.*, 2018). These differences are influenced by factors such as harvest season, agronomic practices, environmental conditions, and genetic variations, which significantly impact the qualitative and quantitative concentrations of vitamins, bioactive compounds, and antioxidant capacity in uvaia fruits (Schmidt *et al.*, 2019).

3. Composition

3.1 Chemical composition

Table 1 summarises studies on uvaia fruit pulp and its residue, emphasising their nutritional significance. The fruit's acidity, primarily from malic and citric acids, is evident from pH values (2.96–3.74 for pulp) (da Silva *et al.*, 2022) and total titratable acidity (0.83–3.70% citric acid equivalent on a wet matter basis of the sample (WMB)) (Spricigo *et al.*, 2023). The residue, mainly seeds, is less acidic, indicated by a higher pH (Rodrigues *et al.*, 2021a). Uvaia pulp is high in sugar content (3.60–15.30 °Brix), contributing to its sweetness (da Silva *et al.*, 2022; Spricigo *et al.*, 2023). In contrast, fruit residue has fewer soluble solids (Rodrigues *et al.*, 2021a). Among accessions, "Rugosa Doce" and "Doce de Patos de Minas" are the sweetest, while "Rugosa" and "Pêra" have lower acidity (da Silva *et al.*, 2019).

Both uvaia pulp and residue are water-rich and perishable. Carbohydrates are abundant in the fruit pulp (4.20–11.64 g 100 g⁻¹ on a dry matter basis of the sample (DMB)), with lower protein (0.66–1.69 g 100 g⁻¹ DMB) and lipid levels (0.21–0.61 g 100 g⁻¹ DMB) (da Silva *et al.*, 2022). Fructose is the primary sugar, followed by sucrose and glucose, mainly in the edible part of the fruit (Farias *et al.*, 2020a). The residue contains even more carbohydrates (20.99 g 100 g⁻¹ DMB), likely due to starch in the seeds (Rodrigues *et al.*, 2021a). Uvaia pulp is a significant dietary fibre source, supplying 15.97% to 25.68% and 24.28% to 39.03% of daily fibre needs for adult men and women, respectively, when consuming 200 g (da Silva *et al.*, 2019). The fruit's peels and seeds also contain a high fibre content (Ramos *et al.*, 2017). Pectin, alongside soluble solids and pH, influences uvaia's texture, structure, and

preservation (da Silva *et al.*, 2018b). Despite potential physicochemical composition differences between uvaia pulp and residue, both portions show promise as raw materials in the food sector. Uvaia also contains bioactive compounds with significant chemical properties, which will be further discussed.

Table 1 – Physico-chemical composition of uvaia pulp and residue after separation of uvaia pulp

Analysis	Pulp		Residue	
	Content	Reference	Content	Reference
Ph	2.96– 3.74	(da Silva <i>et al.</i> , 2022)	3.93	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Soluble solids (° Brix)	3.60– 15.30	(da Silva <i>et al.</i> , 2022; Spricigo <i>et al.</i> , 2023)	2.70	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Total titratable acidity (% citric acid eq. in fresh weight)	0.83– 3.70	(Spricigo <i>et al.</i> , 2023)	NR ^b	
Moisture (g 100 g ⁻¹)	80.68– 94.50	(Sganzerla <i>et al.</i> , 2021; da Silva <i>et al.</i> , 2022)	76.0– 89.20	(Ramos <i>et al.</i> , 2017; Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Ash (g 100 g ⁻¹)	0.23– 0.52	(da Silva <i>et al.</i> , 2022)	0.25– 0.31	(Ramos <i>et al.</i> , 2017; Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Proteins (g 100 g ⁻¹)	0.66– 1.69	(da Silva <i>et al.</i> , 2022)	2.64– 2.66	(Ramos <i>et al.</i> , 2017; Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Lipids (g 100 g ⁻¹)	0.21– 0.61	(da Silva <i>et al.</i> , 2022)	0.35– 0.36	(Ramos <i>et al.</i> , 2017; Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Carbohydrates (g 100 g ⁻¹)	4.20– 11.64	(da Silva <i>et al.</i> , 2022)	20.99	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Total sugar (g sucrose 100 g ⁻¹)	1.63– 4.48	(Sganzerla <i>et al.</i> , 2021)	NR ^b	
Reducing sugar (g glucose 100 g ⁻¹)	1.19– 3.87	(Sganzerla <i>et al.</i> , 2021)	NR ^b	
Non-reducing sugar (g sucrose 100 g ⁻¹)	0.02– 1.36	(Sganzerla <i>et al.</i> , 2021)	NR ^b	
Dietary fiber (g 100 g ⁻¹)	3.27– 3.72	(da Silva <i>et al.</i> , 2019)	4.72	(Ramos <i>et al.</i> , 2017)

Soluble pectin (g GA ^a 100 g ⁻¹)	0.17– 0.18	(Farias <i>et al.</i> , 2020b)	NR ^b
Total pectin (g GA 100 g ⁻¹)	0.95	(da Silva <i>et al.</i> , 2022)	NR ^b

Values expressed on a wet basis. ^aGalacturonic acid. ^bNot reported.

3.2 Phytochemical composition

3.2.1 Ascorbic acid

The absence of the L-gulonolactone oxidase enzyme in humans necessitates the consumption of ascorbic acid (vitamin C) for essential physiological and metabolic functions (Caritá *et al.*, 2020). As a potent antioxidant, it protects cell membranes and enhances iron absorption from plant-based sources (Dacoreggio *et al.*, 2021).

Research has documented varying levels of vitamin C in uvaia, ranging from 1.37 to 142 mg AA 100 g⁻¹ WMB (Jacomino *et al.*, 2018; da Silva *et al.*, 2019, 2022; Schmidt *et al.*, 2019; Taver *et al.*, 2022). "Doce de Patos de Minas" is a promising vitamin C source among different accessions (da Silva *et al.*, 2019). Moreover, uvaia fruits grown in southeastern Brazil generally exhibit higher vitamin C levels than those from the southern region (Sganzerla *et al.*, 2021).

Tomaz *et al.* (2019) found that the ascorbic acid content in uvaia pulp surpasses orange juice by 40%, underscoring uvaia's potential as an alternative vitamin C source. Consuming 100 g of uvaia fruit can exceed the recommended daily intake of vitamin C for adults (75 mg for women and 90 mg for men) (Institute of Medicine, 2000). However, only a tiny fraction of this vitamin is present in the residue from uvaia pulp separation (3.36 mg AA 100 g⁻¹ WMB) (Rodrigues *et al.*, 2021a).

Vitamin C is susceptible to degradation in aqueous media, especially under elevated pH levels and in the presence of oxygen and metallic ions (Caritá *et al.*, 2020). They observed an average 63% decrease in vitamin C content over storage, regardless of the freezing method employed. Hence, while uvaia shows promise as an alternative vitamin C source with potential health benefits, preserving its stability is crucial for optimal consumption.

3.2.2 Carotenoids

Carotenoids, characterised by a polyene structure with varying conjugated double bonds, are plant compounds responsible for hues spanning from yellow to red (Rodriguez-Concepcion *et al.*, 2018). Industrially, carotenoids serve as colourants in food, beverages, and pharmaceuticals (Eggersdorfer and Wyss, 2018), offering diverse health benefits primarily due to their antioxidant properties, contributing to enhanced cognitive function, eye health, cardiovascular health, and reduced risk of certain cancers (Eggersdorfer and Wyss, 2018). Animals rely on dietary intake due to their inability to synthesise carotenoids (Egea and Pereira-Netto, 2019).

Uvaia fruits derive their colouration from carotenoids such as β -carotene, β -cryptoxanthin, α -carotene, lutein, and zeaxanthin, some of which are vitamin A precursors (Spricigo *et al.*, 2023). Additional carotenoids, including 13-cis- β -carotene, 9-cis- β -carotene, and 5,6-epoxide, are also present (de Araújo *et al.*, 2019). Uvaia pulp contains carotenoid concentrations ranging from 1.3 to 441.26 mg 100 g⁻¹ WMB (da Silva *et al.*, 2022), with lower amounts found in the fruit residue (7.20 μ g 100 g⁻¹ WMB) (Rodrigues *et al.*, 2021a).

Uvaia fruits have notably higher carotenoid content than other Myrtaceae family members. In a study of various fruits including araçá, cherry, feijoa, guabiroba, jabuticaba, pitanga, and uvaia, it was found that uvaia exhibited the highest levels of β -carotene (0.1021 g kg⁻¹), lutein (0.0511 g kg⁻¹), zeaxanthin (0.0370 g kg⁻¹), and α -carotene (0.0112 g kg⁻¹) (Schmidt *et al.*, 2019). The “Pêra” variety was identified as the primary source of these compounds (da Silva *et al.*, 2019). However, during fruit processing, carotenoids may degrade due to oxidative enzymatic reactions, photo- and auto-oxidation, and other factors, including light exposure, oxygen, food matrix, enzyme presence, water availability, and antioxidants (Castelucci *et al.*, 2020).

3.2.3 Phenolic compounds

Phenolic compounds, synthesised via pathways such as pentose phosphate, shikimate, and phenylpropanoid, comprise phenolic acids, flavonoids, stilbenes, tannins, lignans, coumarins, curcuminoids, and quinones (Mark *et al.*, 2019).

Flavonoids, a subset of phenolics, encompass anthocyanins, flavanones, isoflavones, and flavanols, deriving from aromatic amino acids like phenylalanine, tyrosine, and malonate (Farias *et al.*, 2020b). Typically glycosylated in plants, these compounds contribute to the vibrant hues of fruits (Egea and Pereira-Netto, 2019).

Renowned for their antioxidant, anticancer, anti-inflammatory, and antimicrobial properties, phenolic compounds offer potential as natural food preservatives and disease preventatives, including cancer, diabetes, heart diseases, and neurodegenerative conditions, while also retarding ageing (Mark *et al.*, 2019).

Uvaia fruits exhibit high phenolic compound content, predominantly gallic acid, alongside flavanols such as quercetin, myricetin, kaempferol, and rutin, galotannins like galloyl-bis-hexahydroxydiphenoyl hexoside, trigalloyl acid lactonised, and galloyl hexoside, and phenolic acids such as chlorogenic acid and caffeic acid (Farias *et al.*, 2020b; Spricigo *et al.*, 2023). Pulp concentrations range from 89.7 to 483.25 mg gallic acid 100 g⁻¹ WMB, with higher levels in “Rugosa” and “Rugosa Doce” accessions (da Silva *et al.*, 2019, 2022; Taver *et al.*, 2022).

The phenolic content in uvaia seeds significantly surpasses that of the edible portion, approximately fivefold, with flavonoid concentration about 16 times higher (Farias *et al.*, 2020a), representing an overlooked yet valuable resource. Uvaia residues (peel and seeds) also contain substantial phenolic amounts, ranging from 54.64 to 404 mg gallic acid 100 g⁻¹ WMB, with at least 13 bioactive compounds identified, including ascorbic acid, *p*-coumaric acid, gallic acid, chlorogenic acid, epicatechin, taxifolin, rutin, myricetin, quercetin, isoquercetin, quercetin-3-o-pentoside, quercetrin, and bellidifolin-8-o-glucoside (Ramos *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2021a). Studies indicate that uvaia fruit maintains nutritional quality post-processing, with similar antioxidant content between fresh, frozen, and pasteurised forms, highlighting its suitability for fresh or processed consumption (Jacomino *et al.*, 2018).

3.2.4 Volatile compounds

Fruits release various volatile compounds, contributing to their distinctive flavour and aroma. These compounds, including esters, alcohols, aldehydes, ketones, lactones, terpenoids, and apocarotenoids, are synthesised through various metabolic pathways utilising lipids, amino acids, terpenoids, and carotenoids (El Hadi *et al.*, 2013). These compounds undergo further modification reactions, such as acylation, methylation, oxidation/reduction, and cyclic ring closure (El Hadi *et al.*, 2013).

da Silva *et al.* (2019) identified 77 volatile compounds, with terpenes, monoterpenes, and sesquiterpenes comprising 46.75% of the total, followed by esters (29.87%), aliphatic alcohols (9.09%), aldehydes (5.19%), aromatic hydrocarbons (2.59%), alkenes (2.59%), and ketones (1.29%). Among these compounds, only three

sesquiterpenes (o-elemene, α -cubebene, and (-)- δ -cadinene), three esters (ethyl butyrate, hexyl hexanoate, and 3-hexenyl hexanoate), and three aliphatic alcohols and aldehydes (hexanal, 1-hexanol, and nonanal) were consistently found in all uvaia accessions. Terpenes are known for their anticancer properties, targeting cancer-specific processes and inducing tumour cell death (da Silva *et al.*, 2019).

Freitas *et al.* (2019) identified 59 aroma-associated compounds in uvaia. Advanced ripening stages exhibited compounds with pleasant odours, including octyl butyrate, 1-octanol, and isoamyl acetate (fruity), as well as β -ocimene and nonanal (floral). Compounds indicative of quality deterioration and senescence onset, such as isoamyl alcohol, pentanal, ethanol, and neryl acetone, were also identified. This diversity in volatile composition can be attributed to factors such as plant genetic diversity, extraction methods, and harvesting timing and location (Durazzini *et al.*, 2019).

4. Biological activities

4.1 Antioxidant activity

The scientific community has displayed significant interest in natural antioxidants' safety, nutritional potential, and therapeutic effects (Schmidt *et al.*, 2019). In contrast, synthetic antioxidants fail to replicate fruits' synergistic phytochemical composition, leading to a lack of desired health benefits (Egea and Pereira-Netto, 2019).

Uvaia's antioxidant activity has been assessed using various methods, including DPPH, ABTS, and FRAP. Results varied across methods: DPPH values ranged from 923 to 7387.8 mg Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) 100 g⁻¹ WMB, ABTS values ranged from 33 to 923.50 mg TEAC 100 g⁻¹ WMB, and FRAP values ranged from 227 to 933 mg TEAC 100 g⁻¹ WMB (Lopes *et al.*, 2018; Egea and Pereira-Netto, 2019; Castelucci *et al.*, 2020; Farias *et al.*, 2020b).

Additionally, uvaia's antioxidant capacity was evaluated using the hypochlorous acid (HOCl) elimination method for the first time. Uvaia exhibited significantly higher antioxidant activity than cambuci (*Campomanesia phaea*), with an EC₅₀ value of 7.82 μ g mL⁻¹, approximately six times lower than cambuci. Other *Eugenia* genus species, including grumixama, Rio-Grande cherry, araçá-Piranga, and pêssego-do-mato, showed significantly lower antioxidant capacities than uvaia, ranging from approximately five to seventeen times less (Taver *et al.*, 2022).

The "Rugosa Doce" variety showed the highest antioxidant activity in its pulp, potentially due to its elevated concentration of phenolic compounds and other secondary metabolites (da Silva *et al.*, 2019). Harvesting uvaia fruits before maturity does not compromise their antioxidant capacity; as Freitas *et al.* (2019) suggested, harvesting at the green stage maintains antioxidant potential comparable to that of more mature fruits.

Lopes *et al.* (2018) examined uvaia's *in vivo* bioactivity by studying its effect on oxidative stress and antioxidant defences in rats fed a high-fat diet. Uvaia juice exhibited high antioxidant activity (approximately 135 mg GAE 100 g⁻¹), significantly reducing carbonylated protein levels by 47.4% and increasing catalase enzyme activity by 29%, suggesting potential benefits in preventing and treating chronic diseases associated with oxidative stress.

Uvaia seeds demonstrate significantly higher antioxidant capacity than the edible portion, with a fivefold increase in DPPH and ABTS assays and a twofold increase in the ORAC assay (Farias *et al.*, 2020a), highlighting the potential utilisation of this fraction.

The health-promoting effects of fruits primarily stem from compounds such as ascorbic acid, carotenoids, and phenolic compounds, possessing antioxidant capacity, scavenging free radicals, peroxides, and singlet oxygen, and acting as enzyme inhibitors and synergists, enhancing their antioxidant effects (Castelucci *et al.*, 2020).

4.2 Antimicrobial activity

Numerous studies have investigated *Eugenia* species' antimicrobial properties against gram-positive and gram-negative bacteria and yeast fungi, attributed to compounds like alkaloids, lignins, phenolics, and terpenoids (De Souza *et al.*, 2018). Uvaia essential oil demonstrated promising activity against methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA) with a MIC value of 125 µg mL⁻¹, a significant finding given MRSA's antibiotic resistance (de Souza *et al.*, 2021). Additionally, uvaia seeds exhibited antimicrobial activity against various strains, including *E. faecalis*, *C. albicans*, *C. krusei*, *C. parapsilosis*, *S. aureus*, *B. cereus*, *P. aeruginosa*, *L. innocua*, and *E. coli* (de Araújo *et al.*, 2019).

In a recent study, dos Santos *et al.* (2023) investigated the antimicrobial potential of extracts derived from Brazilian fruit residues (araçá, uvaia, guabiroba, and butiá) and

starch-based films incorporating these extracts. The extracts and films exhibited antimicrobial activity against *Listeria monocytogenes*, *L. innocua*, *B. cereus*, and *S. aureus*, with uvaia extracts showing a 2 cm inhibition zone, while films ranged from 1.23 to 1.4 cm. The films demonstrated a release profile within the first hour under refrigeration, suggesting potential for food preservation, particularly against pathogenic bacteria at low temperatures.

5. Approaches for extraction of bioactive compounds from uvaia

The growing interest in uvaia bioactive compounds presents significant opportunities for the food industry, driven by their potential health benefits and food preservation properties (Amarowicz and Pegg, 2019). Incorporating these compounds into food products offers advantages such as microbial inhibition, lipid oxidation-reduction, and preservation of sensory characteristics (Munekata *et al.*, 2023).

Table 2 summarises studies on phenolic compound extraction from uvaia, employing varied methods, solvents, ratios, temperatures, and times, resulting in notable extraction variations attributed to sample composition, solvent choice, and experimental conditions.

Table 2 – Literature review on studies investigating the extraction of phenolic compounds from uvaia

Sample	Solvent	Solid ratio (g mL ⁻¹)	Extraction method	Temperature (°C)	Time (min)	Phenolic compounds (mg GAE ^c g ⁻¹)	Reference
Pulp	Supramolecular solvents (octanoic acid - 5%, ethanol – 27.5%, and acidified water – 67.5%)	0.02	Vortex-assisted extraction	25	5	40.42 ^b	(Ueda <i>et al.</i> , 2024)
Freeze-dried peel, seed, and pulp	80% (w/w) ethanol	0.2	Ultrasound-assisted extraction with bath (40 kHz)	30	60	181.9 ^a	(dos Santos <i>et al.</i> , 2023b)
Pulp	100% methanol	0.1	Magnetic stirrer-assisted extraction	Room temperature	30	0.71 ^b	(Wanderley <i>et al.</i> , 2022b)
Pulp	Water	0.25	Ultrasound-assisted extraction with probe (20 KHz, 750 W, amplitude - 40%)	40	10	0.62 ^b	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2021b)
Peel and seed	Water	0.25	Ultrasound-assisted extraction with probe (20 KHz, 750 W, amplitude - 40%).	40	2.5	0.54 ^b	(Rodrigues <i>et al.</i> , 2021a)
Freeze-dried seed	Ethanol–water (8:2, v/v)	0.1	Ultrasound-assisted extraction with bath (two cycles) (25 kHz, 120 W)	Room temperature	10	237.44 ^a	(Farias <i>et al.</i> , 2020a)
Freeze-dried pulp and peel	Ethanol–water (8:2, v/v)	0.1	Ultrasound-assisted extraction with bath (two cycles)	Room temperature	10	49.36 ^a	(Farias <i>et al.</i> , 2020a)

Pulp	70% (w/w) ethanol	0.1	(25 kHz, 120 W) Refrigerated solid-liquid extraction	Refrigerated	Seven days	4.33 ^b	(Sganzerla <i>et al.</i> , 2019)
Pulp	Ethanol	0.1	Refrigerated solid-liquid extraction	Refrigerated	Seven days	2.30 ^b	(Sganzerla <i>et al.</i> , 2019)
Pulp	Water	0.1	Refrigerated solid-liquid extraction	Refrigerated	Seven days	0.67 ^b	(Sganzerla <i>et al.</i> , 2019)
Purée of Uvaia	Absolute methanol	0.25	Rotary mixer-assisted extraction	Room temperature	60	0.59 ^b	(Haminiuk <i>et al.</i> , 2014)

^aValues are expressed on a dry basis. ^bValues are expressed on a wet basis. ^cGalic acid equivalent.

Some studies achieved high phenolic content. For instance, dos Santos *et al.* (2023) obtained 181.9 mg GAE g⁻¹ DMB from lyophilised uvaia residue using ultrasound-assisted extraction, while Farias *et al.* (2020a) attained 237.44 mg GAE g⁻¹ DMB from lyophilised seeds. These findings inform the optimisation of extraction processes for uvaia residues, enhancing the value of this raw material through incorporation into unbound or encapsulated forms, films, and coatings.

The process of extracting bioactive compounds from uvaia is depicted in Fig. 1.

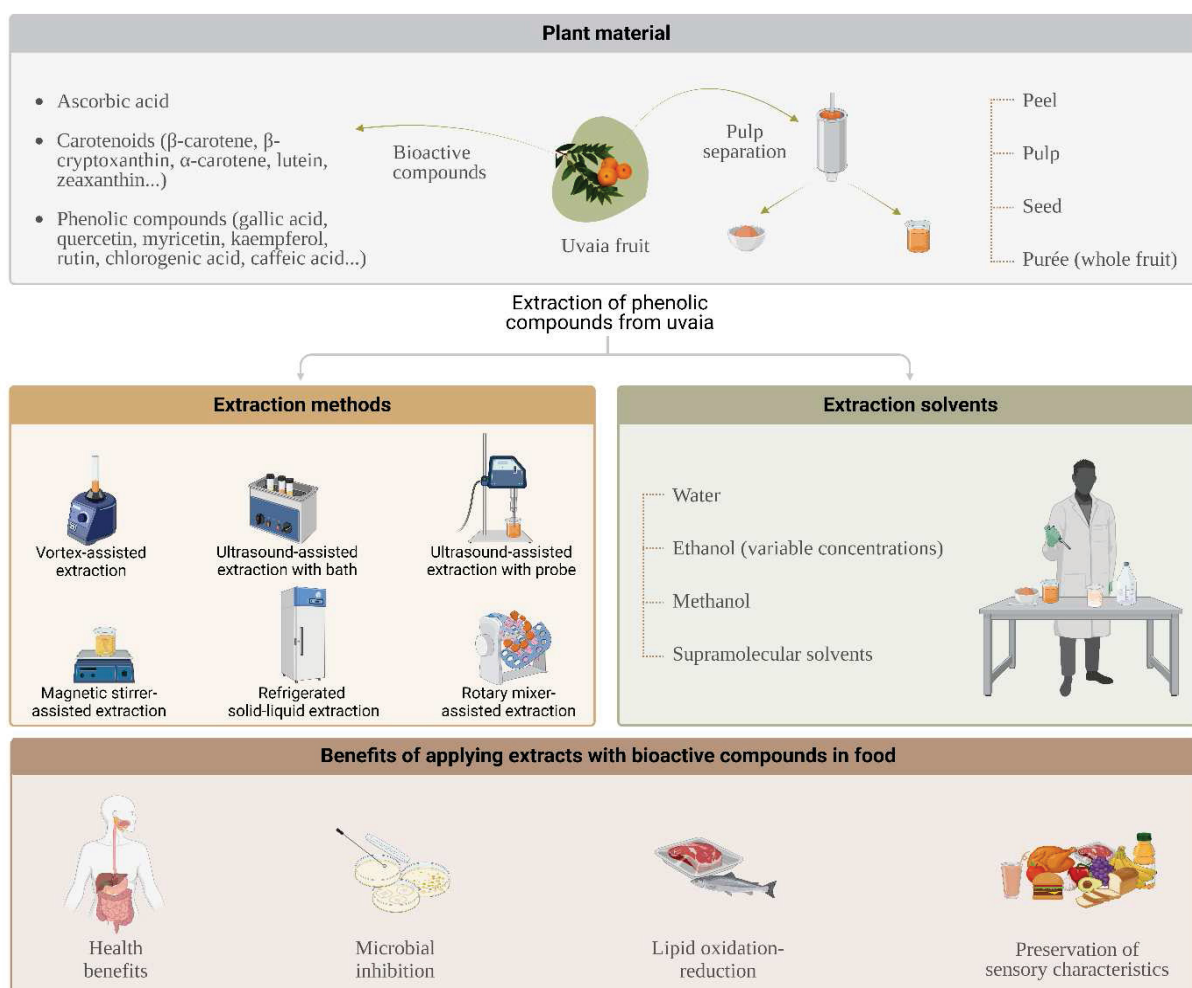


Fig. 1 Extraction of bioactive compounds from uvaia: plant material, extraction methods, and solvents (Agreement number: FQ26YTK6D1).

6. Conservation and processing methods of uvaia: opportunities in the food industry

The revelation of the nutritional composition and phytochemical content of uvaia fruit fractions has aroused researchers' interest in fruit preservation and processing (Fig. 2).

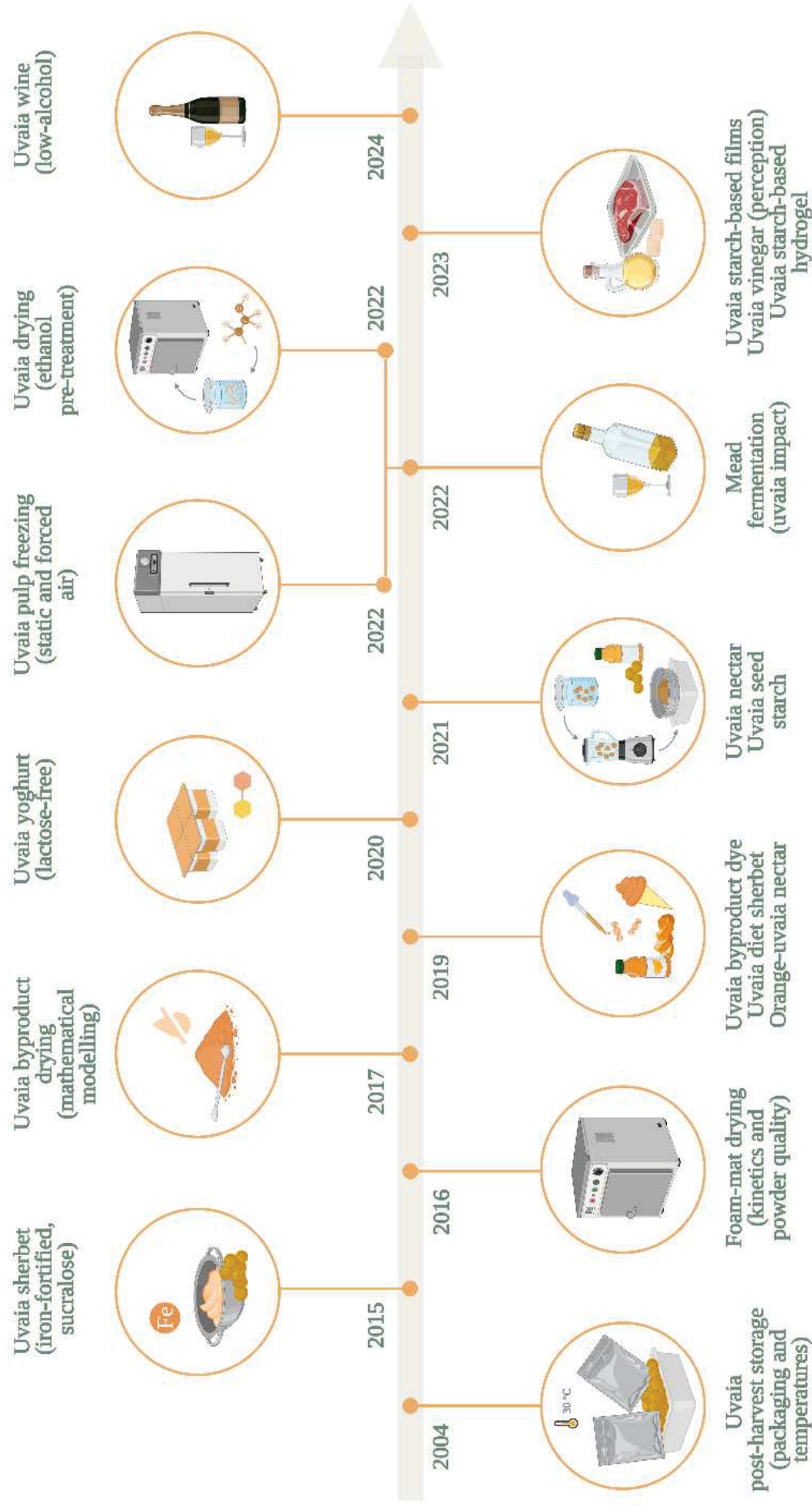


Fig. 2 Chronological evolution of uvaia conservation and processing methods in Food Science. Created with BioRender.com (Agreement number: KF26RPWPNO).

6.1 Uvaia fruit conservation and processing

Scalon *et al.* (2004) carried out initial efforts to extend the shelf life of the fruits, evaluating different packaging and storage temperatures. Laminated polyvinyl chloride packaging and plastic packaging with an ethylene absorber mitigated mass loss, thus preserving marketable quality for up to 4 days at 30 °C and 12 days under refrigeration.

In another study, Gomes *et al.* (2022) investigated the impact of ethanol pre-treatment during convective drying of uvaia (seedless fruit pieces). Samples were pre-treated with 99.8% v/v ethanol for 10 and 20 minutes, followed by drying at 40 and 60 °C with an air velocity of 1 m/s. They observed reductions in phenolic compounds (16% to 34%) and antioxidant capacity (13% to 45%) attributed to compound degradation and potential extraction by ethanol. The resulting dehydrated uvaia can be directly consumed or utilised in food products, such as cereal bars, granola, and cookies (Gomes *et al.*, 2022).

6.2 Uvaia pulp conservation and processing

Branco *et al.* (2016) studied the influence of different formulations on the drying characteristics and quality of uvaia pulp powder obtained via foam drying at 60 and 70 °C. Higher temperatures reduced drying time and increased effective diffusivity, although uvaia powder obtained at 70 °C exhibited diminished bioactive compounds compared to fresh pulp.

In an attempt to preserve fruits through cold storage, Macedo *et al.* (2022) compared the stability of uvaia pulp under two freezing methods—static air and forced air—over 12 months. Forced air freezing demonstrated superior preservation of pulp colour, pH, carotenoids, phenolics, and antioxidant capacity—however, prolonged frozen storage led to alterations in phenolic and volatile compound composition.

Beyond its proven benefits in fresh consumption and juices, uvaia incorporation in foods offers promising results. In the early stages of this investigation, Giarola *et al.* (2015) developed a light uvaia sherbet fortified with iron (9 to 15 mg 100 g⁻¹).

Sucrose was replaced by sucralose (66-94%), reducing the caloric value by more than 25%. The sherbets showed high acceptability, stability, and resistance to thawing. Following this line, Giarola *et al.* (2019) developed iron-fortified uvaia diet sherbet by incorporating golden flaxseed meals, reducing glycemic load and ice

crystal sizes. Moreover, adding flaxseed meal at 1-2% (w/w) improved rheological, thermal, and microstructural properties.

Bianchini *et al.* (2020) observed that adding pasteurised uvaia pulp to lactose-free yoghurt elevated fructose content and enhanced total phenolic compounds, carotenoids, and antioxidant activity, enhancing sensory acceptance. Similarly, Tomaz *et al.* (2019) found that incorporating 20-30% uvaia pulp into orange nectar significantly increased levels of ascorbic acid and phenolic compounds, with a notable improvement in microbiological stability observed with a 30% pulp addition. Justino *et al.* (2021) formulated uvaia-based nectars exclusively, with 30-50% pulp. As the concentration increased, the acidity and ascorbic acid content increased proportionally. Formulations containing 40% and 50% pulp showed higher concentrations of bioactive compounds. Leveraging the fruit's acidic nature, Wanderley *et al.* (2023) surveyed consumer interest in fruit vinegar, including uvaia, indicating potential beyond traditional varieties.

Ferreira *et al.* (2024) developed low-alcohol uvaia wine using enzyme and ultrasound treatments pre-fermentation. The wine treated with pectinase and ultrasound showed high levels of malic acid, phenolic compounds, and antioxidant activity. Further within the realm of beverages, Wanderley *et al.* (2022a) investigated the addition of uvaia pulp on the profile of organic acids during mead fermentation, observing increases in malic, lactic, and succinic acids. The meads reached peak yeast activity within three days, whereas the control took seven days.

6.3 Uvaia residue conservation and processing

Valorising uvaia residues has become a significant focus of research. Studies on uvaia residues for hard sugar-coated confections aim to substitute synthetic dyes with the yellowish-brown colour of dried by-products. de Avelar *et al.* (2019) emphasised the sustainability and cost-effectiveness of using these by-products as natural colourants, enriching products with antioxidants, vitamins, and minerals while enhancing texture. Guedes *et al.* (2021) identified uvaia seeds as a novel starch source, suggesting applications in various food products, including puddings, soups, cakes, sauces, sausages, candies, films, and medicine capsules. The starch of uvaia and other Brazilian fruits was used to create hydrogels, three-dimensional networks that absorb and retain water (dos Santos *et al.*, 2023a). These hydrogels have properties influenced by starch gelatinisation and retrogradation behaviours,

impacting potential food industry applications, such as fat substitutes, delivery systems and encapsulants (Nath *et al.*, 2023).

Ramos *et al.* (2017) investigated the drying process of uvaia by-products, noting a 3-21% reduction in total phenolic content in the dried products. However, the authors propose that these by-products can serve as stable ingredients in formulations, particularly in bakery and confectionery products. dos Santos *et al.* (2023) investigated the antimicrobial potential of uvaia bagasse extracts and their effects on the physicochemical and mechanical properties of starch-based films derived from bean residues. The mechanical properties of the films remained largely unaffected by the uvaia extract. Antioxidant release from the films was observed after 1 hour, with a further increase after 24 hours, sustained for up to 48 hours. Films with antimicrobial and antioxidant properties are crucial for extending the shelf life of ready-to-eat foods and meeting the growing demand for sustainable food packaging materials. Fig. 3 illustrates the potential applications of uvaia in food.

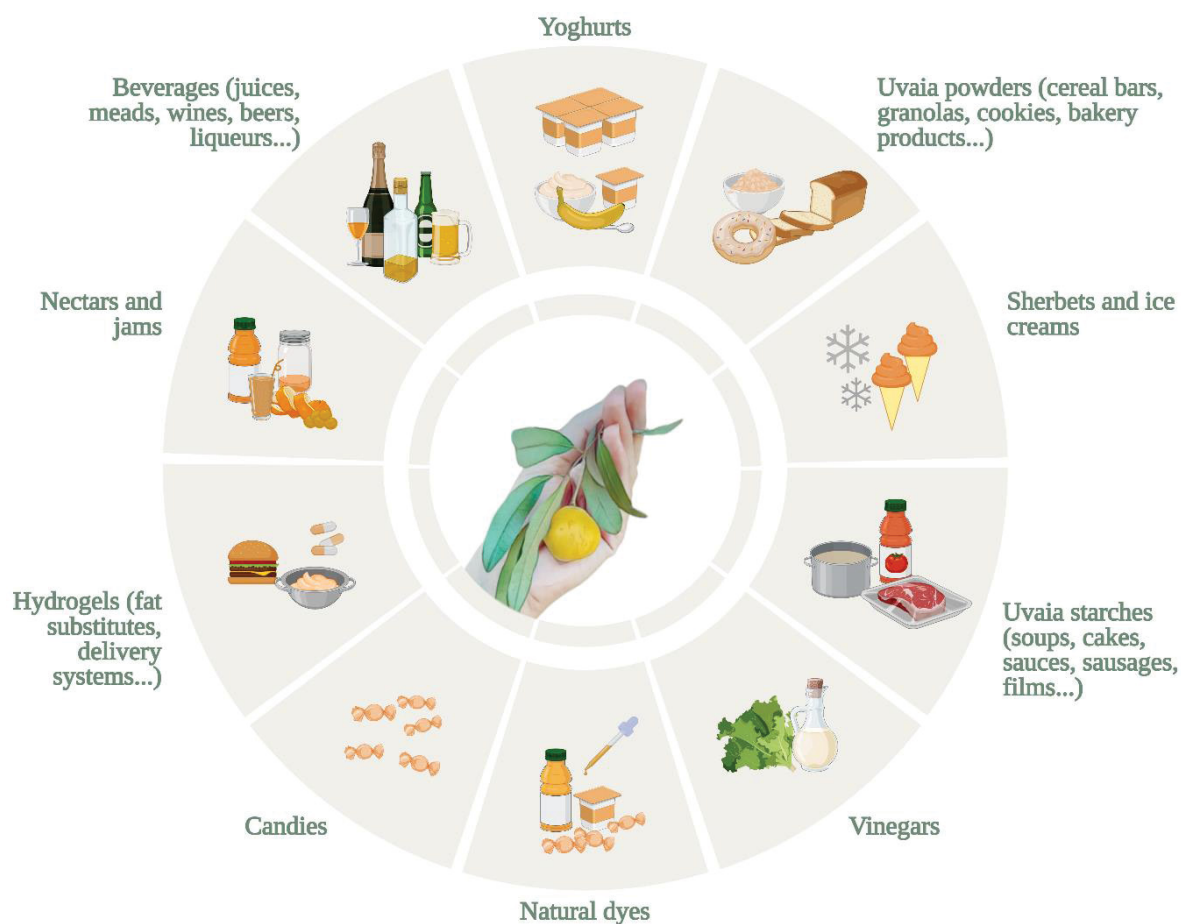


Fig. 3 Potential applications of uvaia in food. Created with BioRender.com (Agreement number: KD26RPXBOD).

7. Future perspectives and challenges

Research primarily focuses on analysing uvaia to understand its sensory attributes, nutrition, phytochemicals, and potential health benefits. However, its short shelf life of 1 to 4 days and limited availability due to seasonal harvests hinder widespread consumption (da Silva *et al.*, 2018a; Freitas *et al.*, 2019). Thus, exploring preservation methods is vital. Alternative techniques such as freeze-drying and spray drying may minimise bioactive compound loss, while further research on foam layer drying and formulation improvement is recommended to preserve these compounds better. Long-term storage effects need examination to ensure food quality.

Limited information exists on uvaia processing techniques, underscoring the need for method development and new product exploration beyond traditional items like yoghurt and nectar. Incorporating uvaia into various formulations presents a challenge in preserving its bioactive compounds. Research is required to understand the physiological impact of consuming uvaia and explore its other functional properties beyond antioxidants.

Studying stability, sensory acceptability, and consumer preferences is essential for large-scale commercialisation. Exploring the utilisation of uvaia residues, including peel and seeds, in various applications, such as natural dyes, functional ingredients, or sources of bioactive compounds, can reduce waste and enhance sustainability in the food chain. While some research exists on bioactive compound extraction using ultrasound, alternative techniques warrant exploration, considering economic and safety factors. Establishing safe dosages is needed for food applications.

Disseminating uvaia's potential in the food industry is crucial for its commercial viability. Building bridges between the scientific community and the industry can promote its incorporation into various food products, enhancing market presence.

8. Conclusion

This review offers a comprehensive overview of uvaia, covering its chemical composition, biological activities, and recent advancements in food science applications. Uvaia, known for its rich nutritional profile and diverse bioactive compounds such as ascorbic acid, carotenoids, and phenolics, delivers antioxidant and antimicrobial benefits. Research has shown that incorporating uvaia pulp into products like yoghurt, nectar, and ice cream enhances their nutritional value, sensory

appeal, and shelf life. Furthermore, exploring uvaia by-products presents opportunities to reduce waste and promote sustainability.

Despite the remarkable findings, there are still limitations in exploring the resources of uvaia. It is crucial to foster collaboration between the scientific community and food manufacturers to achieve commercial viability and establish uvaia's presence in the market. Persisting in research in these domains is essential to unlock the full potential of uvaia as a valuable fruit for the food industry.

Acknowledgements

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES—Brazil), Finance Code 001. The authors also thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq—Brazil), grant numbers [407877/2018-5 and 304722/2019-7]. A graphic abstract was created on BioRender.com (Agreement number: PX26RQNP2H).

Author contributions

Mariana Aguiar Cargnin: Conceptualization; data curation; investigation; writing — original draft; writing — review & editing. **Katia Rezzadori:** Conceptualization; writing — review & editing. **Isabela de Andrade Arruda Fernandes:** Investigation; writing — review & editing. **Charles Windson Isidoro Haminiuk:** Investigation; writing — review & editing. **Franciny Campos Schmidt:** Conceptualization; supervision; writing — review & editing.

Ethical Guidelines

Ethics approval was not required for this research.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Data Availability

Data sharing does not apply to this article as no new data were created or analysed in this study.

References

- Amarowicz, R. & Pegg, R.B. (2019). Natural antioxidants of plant origin. In: *Advances in Food and Nutrition Research* (edited by I.C.F.R. Ferreira & L. Barros). Pp. 1–81. Academic Press Inc.
- Araújo, F.F. de, Neri-Numa, I.A., Farias, D.D.P., Cunha, G.R.M.C. da & Pastore, G.M. (2019). Wild Brazilian species of *Eugenia* genera (Myrtaceae) as an innovation hotspot for food and pharmacological purposes. *Food Research International*, **121**, 57–72.
- Avelar, M.H.M. de, Silva, L.B. da, Azevedo, F.B. de & Efraim, P. (2019). A byproduct of uvaia (*Eugenia pyriformis*) processing as a natural source for coloring sugar hard-panning confections. *Journal of Food Process Engineering*, **42**, e13250.
- Bianchini, C.B., Vieira, M.P.T., Arriola, N.D.A., Dias, C.O., Seraglio, S.K.T., Costa, A.C.O., Komatsu, R.A., Machado, B.D., Amboni, R.D.M.C. & Fritzen-Freire, C.B. (2020). Incorporation of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) pulp in yogurt: A promising application in the lactose-free dairy product market. *Journal of Food Processing and Preservation*, **44**, e14829.
- Branco, I.G., Kikuchi, T.T., Argandoña, E.J.S., Moraes, I.C.F. & Haminiuk, C.W.I. (2016). Drying kinetics and quality of uvaia (*Hexachlamys edulis* (O. Berg)) powder obtained by foam-mat drying. *International Journal of Food Science and Technology*, **51**, 1703–1710.
- Caritá, A.C., Fonseca-Santos, B., Shultz, J.D., Michniak-Kohn, B., Chorilli, M. & Leonardi, G.R. (2020). Vitamin C: One compound, several uses. Advances for delivery, efficiency and stability. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, **24**, 102117.
- Castelucci, A.C.L., Silva, P.P.M. da, Spoto, M.H.F., Silva, P.P.M. da & Spoto, M.H.F. (2020). Bioactive compounds and *in vitro* antioxidant activity of pulps from fruits from the Brazilian Atlantic forest. *Acta Scientiarum - Technology*, **42**, e44503.
- Dacoreggio, M.V., Santetti, G.S., Inácio, H.P., Kempka, A.P. & Amboni, R.D. de M.C. (2021). A comprehensive review of *Eugenia pyriformis* Cambess: reported bioactivities and health effects. *Food Reviews International*, **39**, 2477–2491.
- Durazzini, A.M.S., Machado, C.H.M., Fernandes, C.C. & Miranda, M.L.D. (2019). Chemical composition and effect of hydrodistillation times on the yield of essential oil from *Eugenia pyriformis* leaves. *Orbital*, **11**, 334–338.
- Egea, M.B. & Pereira-Netto, A.B. (2019). Bioactive compound-rich, virtually unknown, edible fruits from the Atlantic Rainforest: changes in antioxidant activity and related bioactive compounds during ripening. *European Food Research and Technology*, **245**, 1081–1093.
- Eggersdorfer, M. & Wyss, A. (2018). Carotenoids in human nutrition and health. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **652**, 18–26.
- Farias, D. d P., Araújo, F.F. de, Neri-Numa, I.A., Dias-Audibert, F.L., Delafiori, J., Catharino, R.R. & Pastore, G.M. (2020a). Distribution of nutrients and functional potential in fractions of *Eugenia pyriformis*: An underutilized native Brazilian fruit. *Food Research International*, **137**, 109522.

- Farias, D. d P., Neri-Numa, I.A., Araújo, F.F. de & Pastore, G.M. (2020b). A critical review of some fruit trees from the Myrtaceae family as promising sources for food applications with functional claims. *Food Chemistry*, **306**, 125630.
- Ferreira, A.L.A., Wanderley, B.R. da S.M., Haas, I.C. da S., Biluca, F.C., Costa, A.C. de O., Hoff, R.B., Pereira-Coelho, M., Madureira, L.A. dos S., Aquino, A.C.M. de S., Amboni, R.D. de M.C. & Fritzen-Freire, C.B. (2024). Low-alcohol wine made from uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess): Influence of ultrasound-assisted enzymatic pre-treatment on its bioactive properties. *Microchemical Journal*, **198**, 110177.
- Freitas, T.P., Spricigo, P.C., Purgatto, E. & Jacomino, A.P. (2019). Aroma and soluble solid contents of the uvaia—a native Atlantic rainforest fruit—are negatively affected by early harvest. *Journal of Food Biochemistry*, **43**, e12881.
- Giarola, T.M. d O., Pereira, C.G., Prado, M.E.T., Abreu, L.R. de & Resende, J.V. de. (2019). Effects of golden flaxseed flour on ice recrystallization in uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess.) diet sherbet. *Food and Bioprocess Technology*, **12**, 2120–2135.
- Giarola, T.M. de O., Pereira, C.G. & Resende, J.V. de. (2015). Fortification with iron chelate and substitution of sucrose by sucralose in light uvaia sherbet (*Eugenia pyriformis* Cambess): physical, chemical and sensory characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, **52**, 5522–5533.
- Gomes, B. de O., Santos, K.C., Carvalho, G.R., Bitencourt, B.S., Guedes, J.S. & Augusto, P.E.D. (2022). Uvaia fruit (*Eugenia pyriformis* Cambess) drying: ethanol as pre-treatment, convective drying kinetics and bioactive compounds. *Journal of Food Processing and Preservation*, **46**, e16284.
- Guedes, J.S., Lima, D.C., Castanha, N., Matta Junior, M.D. & Augusto, P.E.D. (2021). Physicochemical and functional properties of a novel starch from uvaia (*Eugenia pyriformis*) seed, a native fruit from Brazil. *Journal of Food Processing and Preservation*, **45**, e15845.
- Hadi, M.A.M. El, Zhang, F.J., Wu, F.F., Zhou, C.H. & Tao, J. (2013). Advances in fruit aroma volatile research. *Molecules*, **18**, 8200–8229.
- Haminiuk, C.W.I., Plata-Oviedo, M.S.V., Mattos, G. de, Carpes, S.T. & Branco, I.G. (2014). Extraction and quantification of phenolic acids and flavonols from *Eugenia pyriformis* using different solvents. *Journal of Food Science and Technology*, **51**, 2862–2866.
- Institute of Medicine. (2000). *Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- Jacomino, A.P., Silva, A.P.G. da, Freitas, T.P. de & Paula Morais, V.S. de. (2018). Uvaia—*Eugenia pyriformis* Cambess. In: *Exotic Fruits Reference Guide*. Pp. 435–438. Amsterdam: Elsevier.
- Justino, J.P.T., Carvalho, P.C. de, Tronconi, J., Santos, E.N.F. & Oliveira Filho, J.H. de. (2021). Manufacture of uvaia nectar and evaluation of physicochemical stability during storage. *Brazilian Journal of Food Technology*, **24**, e2020257.
- Lopes, J.M.M.M.M., Lage, N.N.N., Guerra, J.F.C.F.C., Silva, M.E.E., Bonomo, L.F.F.,

- Paulino, A.H.S.H.S., Regis, A.L.R.S.L.R.S., Pedrosa, M.L.L. & Silva, M.E.E. (2018). A preliminary exploration of the potential of *Eugenia uvalha* Cambess juice intake to counter oxidative stress. *Food Research International*, **105**, 563–569.
- Macedo, L.L., Vilela, D.R., Cunha, M.C. da, Lopes de Carvalho Dias, L., Carvalho, E.E.N., Resende, J.V. de & Barros Vilas Boas, E.V. de. (2022). Stability of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) pulp subjected to freezing by static and forced air. *Journal of Food Process Engineering*, **45**, e13997.
- Mark, R., Lyu, X., Lee, J.J.L., Parra-Saldívar, R. & Chen, W.N. (2019). Sustainable production of natural phenolics for functional food applications. *Journal of Functional Foods*, **57**, 233–254.
- Medeiros, J.P., Bortollucci, W.C., Silva, E.S., Oliveira, H.L.M., Campo, C.F.A.A., Gonçalves, J.E., P. Junior, R., Gazim, Z.C., Junior, R.P. & Gazim, Z.C. (2019). Biocidal potential of *Eugenia pyriformis* essential oil in the control of *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in the free-living cycle. *Pesquisa Veterinaria Brasileira*, **39**, 879–888.
- Munekata, P.E.S., Pateiro, M., Domínguez, R., Nieto, G., Kumar, M., Dhama, K. & Lorenzo, J.M. (2023). Bioactive compounds from fruits as preservatives. *Foods*, **12**, 343.
- Nath, P.C., Debnath, S., Sridhar, K., Inbaraj, B.S., Nayak, P.K. & Sharma, M. (2023). A comprehensive review of food hydrogels: principles, formation mechanisms, microstructure, and its applications. *Gels*, **9**, 1.
- Ramos, K.K., Lessio, B.C., Mecê, A.L.B. & Efraim, P. (2017). Mathematical modeling of uvaia byproduct drying and evaluation of quality parameters. *Food Science and Biotechnology*, **26**, 643–651.
- Rodrigues, L.M., Romanini, E.B., Silva, E., Pilau, E.J., Costa, S.C. da & Madrona, G.S. (2021a). Uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) residue as a source of antioxidants: An approach to ecofriendly extraction. *Lwt*, **138**, 110785.
- Rodrigues, L.M., Romanini, E.B., Silva, E., Pilau, E.J., Costa, S.C. da & Madrona, G.S. (2021b). Uvaia pulp: obtaining a functional product by ultrasound assisted extraction and reverse osmosis. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **15**, 3561–3568.
- Rodriguez-Concepcion, M., Avalos, J., Bonet, M.L., Boronat, A., Gomez-Gomez, L., Hornero-Mendez, D., Limon, M.C., Meléndez-Martínez, A.J., Olmedilla-Alonso, B., Palou, A., Ribot, J., Rodrigo, M.J., Zacarias, L. & Zhu, C. (2018). A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health. *Progress in Lipid Research*, **70**, 62–93.
- Santos, J.S. dos, Biduski, B., Colussi, R., Pinto, V.Z. & Santos, L.R. dos. (2023a). Hydrogel properties of non-conventional starches from guabiju, pinhão, and uvaia seeds. *Food Research International*, **173**, 113243.
- Santos, L.F. dos, Biduski, B., Lopes, S.T., Bertolin, T.E. & Santos, L.R. dos. (2023b). Brazilian native fruit pomace as a source of bioactive compounds on starch-based films: Antimicrobial activities and food simulator release. *International Journal of Biological Macromolecules*, **242**, 124900.

- Scalon, S. de P.Q., Dell'Olio, P. & Fornasieri, J.L. (2004). Temperatura e embalagens na conservação pós-colheita de *Eugenia uvalha* Cambess - Myrtaceae. *Ciência Rural*, **34**, 1965–1968.
- Schmidt, H. de O., Rockett, F.C., Pagno, C.H., Possa, J., Assis, R.Q., Oliveira, V.R. de, Silva, V.L. da, Flôres, S.H. & Rios, A. de O. (2019). Vitamin and bioactive compound diversity of seven fruit species from south Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **99**, 3307–3317.
- Sganzerla, W.G., Beling, P.C., Ferreira, A.L.A., Azevedo, M.S., Ferrareze, J.P., Komatsu, R.A., Nunes, M.R., Lima Veeck, A.P. de & Lima Veeck, A.P. (2019). Geographical discrimination of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) by principal component analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **99**, 6778–6787.
- Sganzerla, W.G., Komatsu, R.A., Passos, J.F.M. dos, Costa, M.D., Stroschein, M.R.D., Schons, P.F. & Veeck, A.P. d L. (2021). Variability in the molecular, phenological, and physicochemical characteristics of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess - Myrtaceae) accessions from the Brazilian Atlantic rainforest. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **35**, 102082.
- Sganzerla, W.G. & Silva, A.P.G. da. (2022). Uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess – Myrtaceae): An overview from the origin to recent developments in the food industry – A bibliometric analysis. *Journal of Agriculture and Food Research*, **10**, 100369.
- Silva, A.P.G. da, Espindola, I.C., Miguel, A.C.A., Spricigo, P.C., Sartori, S. & Jacomino, A.P. (2018a). Postharvest storage of two accessions of uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) at room temperature. *Acta Horticulturae*, **1194**, 959–964.
- Silva, A.P.G. da, Sganzerla, W.G., Jacomino, A.P., Silva, E.P. da, Xiao, J. & Simal-Gandara, J. (2022). Chemical composition, bioactive compounds, and perspectives for the industrial formulation of health products from uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess – Myrtaceae): A comprehensive review. *Journal of Food Composition and Analysis*, **109**, 104500.
- Silva, A.P.G. da, Spricigo, P.C., Purgatto, E., Alencar, S.M. de, Sartori, S.F. & Jacomino, A.P. (2019). Chemical composition, nutritional value and bioactive compounds in six uvaia accessions. *Food Chemistry*, **294**, 547–556.
- Silva, A.P.G. da, Tokairini, T. de O., Alencar, S.M. de & Jacomino, A.P. (2018b). Characteristics of the fruits of two uvaia populations grown in Salesópolis, SP, Brazil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, **40**, e-511.
- Souza, A.M. De, Oliveira, C.F. De, Oliveira, V.B. De, Betim, F.C.M., Miguel, O.G. & Miguel, M.D. (2018). Traditional uses, phytochemistry, and antimicrobial activities of *Eugenia* species - A review. *Planta Medica*, **84**, 1232–1248.
- Souza, A.M. de, Oliveira, V.B. de, Oliveira, C.F. de, Betim, F.C.M., Pacheco, S.D.G., Cogo, L.L., Miguel, O.G. & Miguel, M.D. (2021). Chemical composition and *in vitro* antimicrobial activity of the essential oil obtained from *Eugenia pyriformis* Cambess. (Myrtaceae). *Brazilian Archives of Biology and Technology*, **64**, 1–10.
- Spricigo, P.C., Almeida, L.S., Ribeiro, G.H., Correia, B.S.B., Taver, I.B., Jacomino,

- A.P. & Colnago, L.A. (2023). Quality attributes and metabolic profiles of uvaia (*Eugenia pyriformis*), a native Brazilian Atlantic forest fruit. *Foods*, **12**, 1881.
- Taver, I.B., Spricigo, P.C., Neto, H.B., Alencar, S.M. de, Massarioli, A.P. & Jacomino, A.P. (2022). Bioactive compounds and *in vitro* antioxidant capacity of cambuci and uvaia: An extensive description of little-known fruits from the Myrtaceae family with high consumption potential. *Foods*, **11**, 2612.
- Tomaz, K.S., Silva Ferreira, M.R. Da, Silva Mesquita, M. Da & Oliveira Filho, J.H. De. (2019). Physicochemical and microbiological stability of mixed nectar of orange and uvaia. *Ciencia Rural*, **49**, e20180917.
- Ueda, K.M., Keiser, G.M., Leal, F.C., Farias, F.O., Igarashi-Mafra, L. & Mafra, M.R. (2024). A new single-step approach based on supramolecular solvents (SUPRAS) to extract bioactive compounds with different polarities from *Eugenia pyriformis* Cambess (uvaia) pulp. *Plant Foods for Human Nutrition*, **79**, 242–249.
- Wanderley, B.R. da S.M., Amboni, R.D. de M.C., Aquino, A.C.M. de S. & Fritzen-Freire, C.B. (2023). Evaluation of the perceptions, attitudes, and knowledge of consumers in the south region of Brazil regarding vinegars: Potential application of regional fruits. *Journal of Sensory Studies*, **38**, e12810.
- Wanderley, B.R. da S.M., Haas, I.C. da S., Biluca, F.C., Brugnerotto, P., Aquino, A.C.M. de S., Costa, A.C.O., Amboni, R.D. de M.C. & Fritzen-Freire, C.B. (2022a). How native and exotic Brazilian fruits affect the profile of organic acids and the yeast performance during the mead fermentation process? *JSFA reports*, **2**, 161–167.
- Wanderley, B.R. da S.M., Haas, I.C. da S., Biluca, F.C., Brugnerotto, P., Gomes, T.M., Aquino, A.C.M. de S., Costa, A.C.O., Burin, V.M., Amboni, R.D. de M.C. & Fritzen-Freire, C.B. (2022b). Phenolic profiling, organic acids and sugars composition of feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret) and uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) from the southern Brazilian highlands. *Ciência Rural*, **52**, e20210458.

ANEXO 2 – ESTUDO CIENTÍFICO

Mapping the Literature on the Extraction of Phenolic Compounds from Plants of the Genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia*: A Scientometric Study

Mariana Aguiar Cargnin^a, Katia Rezzadori^b, Franciny Campos Schmidt^{a,*}

^aDepartment of Chemical Engineering, Polytechnic Center, Federal University of Paraná (UFPR), Curitiba, PR, 81531-990, Brazil.

^bDepartment of Food Science and Technology, Agricultural Sciences Center, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 88034-001, Brazil.

*Corresponding author

E-mail: francinyschmidt@gmail.com

Abstract: This study investigated the structure, dynamics, and research trends in extracting phenolic compounds from the genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia*. Descriptive analyses and scientific mapping were conducted. A temporal distribution analysis of scientific articles from Scopus and Web of Science revealed a publication growth from 2010 to 2024. This growth can be attributed to the increasing demand for natural products and the recognized health benefits of phenolic compounds. The unequal distribution of author productivity, according to Lotka's Law, highlighted some prolific authors. Brazil leads in scientific production, emphasizing species such as *Eugenia uniflora* and *Plinia cauliflora*. Non-traditional extraction methods, such as supercritical and ultrasound-assisted extraction, gained prominence, promoting sustainable practices. Keyword co-occurrence analysis revealed eight thematic clusters, covering antioxidant and antimicrobial properties to process optimization and chemical characterization. Key authors and institutions were identified, emphasizing the importance of collaboration for advancing research.

Keywords: Trend analysis; Network analysis; Bioactive compounds; Myrtaceae; Ultrasound-assisted extraction; Supercritical extraction.

1. Introduction

The Myrtaceae family, encompassing approximately 121 genera and 5800 species of perennial trees and shrubs (D. d P. Farias et al., 2020), is a significant source of phenolic compounds renowned for their bioactive properties (Antonelo et al., 2023; Pereira et al., 2022; Soares et al., 2024; Taver et al., 2022). These secondary metabolites, found in fruits and various plant parts, act as defense mechanisms against environmental stresses (Donado-Pestana et al., 2018). c exhibiting diverse phytochemical roles associated with aliphatic or aromatic rings (Lama-Muñoz & Contreras, 2022).

Among the Myrtaceae genera, *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* stand out for their diverse phenolic compounds with significant biological potential (D. d P. Farias et al., 2020; Gasparotto Junior et al., 2019; Pereira et al., 2022). *Eugenia*, with over 1200 species in tropical and subtropical regions (WFO, 2024), holds particular economic and pharmaceutical importance, providing natural antioxidants highly valued in the food, cosmetic, and pharmaceutical industries (A. P. G. da Silva et al., 2022; de Araújo et al., 2019; Sardi et al., 2017). These species exhibit a spectrum of pharmacological activities including antioxidant (A. P. G. da Silva et al., 2019; Dacoreggio et al., 2024; Noguera et al., 2024), antihypertensive (Figueira et al., 2021), anti-inflammatory (Noguera et al., 2024), hypothermic (Amorim et al., 2009), antimicrobial (Dalmagro et al., 2023; A. M. de Souza et al., 2018; Raphaelli et al., 2024), and antifungal effects (D. d P. Farias et al., 2020; Sardi et al., 2017).

Myrciaria comprises approximately 34 species (WFO, 2024), with an extensive occurrence throughout the South and Central Americas, especially in Brazil (Pereira et al., 2022). These species are notable for their phenolic compounds, such as tannins, phenolic acids, and flavonoids (Pereira et al., 2022), which demonstrate various metabolic activities. These activities include antioxidant (Antonelo et al., 2023), anti-inflammatory (dos Santos de Moraes et al., 2023; Fidelis et al., 2020), antimicrobial (Fidelis et al., 2020), antihyperglycemic (Noguera et al., 2024), anticancer (Noguera et al., 2024), antitumor (Ferreira et al., 2024), antiparasitic (do Carmo et al., 2020), and insecticidal properties (Tietbohl et al., 2020).

Plinia encompasses around 80 species, with *Plinia cauliflora* being one of the most prominent (WFO, 2024). This species, found in alluvial areas and open forests across Brazil, Argentina, and Paraguay (Gasparotto Junior et al., 2019), has garnered global attention for its significant phytochemical composition and potential

in food product innovation (I. de A. A. Fernandes et al., 2022; Inada et al., 2021; I. de M. Silva et al., 2023). Its main chemical constituents, including depsides, flavonoids, and tannins, contribute to its antioxidant properties and other beneficial health effects (Gasparotto Junior et al., 2019). Recent research has increasingly focused on the extraction of phenolic compounds from natural sources like *Plinia cauliflora*, exploring alternative extraction methods and solvents (Bueno et al., 2024; F. A. N. Fernandes et al., 2020; Klein, Johann, et al., 2021; Peixoto Araujo et al., 2021; L. M. Rodrigues et al., 2020). These studies aim to incorporate phenolic compounds in various food products, including meat, fish, and vegetables (Saber et al., 2023), leveraging their health benefits and roles in food technology (Amarowicz & Pegg, 2019). These compounds are particularly valued for their antimicrobial and antioxidant properties, inhibiting pathogenic microorganisms' growth and lipid oxidation and function as natural pigments (Saber et al., 2023). For instance, Souza et al. (2023) developed hydroalcoholic extracts from *Eugenia brasiliensis* leaves to preserve fresh tomatoes. Lorenzo et al. (2018) researched *Eugenia uniflora* leaf extracts' effect on pork burger quality and shelf life in modified atmospheres, proposing it as a natural substitute for synthetic antioxidants. Additionally, Dallabona et al. (2020) encapsulated jabuticaba and propolis extracts in alginate spheres as natural colorants for food and beverages. Despite these advancements, comprehensive reviews on phenolic compound extraction from *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* species are scarce. Saber et al. (2023) underscored the significance of the Myrtaceae family in extracting bioactive compounds using advanced technologies for application in food, pharmaceutical, and related industries. Moreover, da Rosa et al. (2022) conducted a bibliometric analysis on *Plinia cauliflora*, identifying sustainable production opportunities for bioactive compounds from its byproducts. Nevertheless, these reviews do not quantitatively assess the scientific production related to phenolic compounds in the *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* genera. Recognizing this gap, the use of scientometric analysis, which uses quantitative and statistical methods (Y. Liu & He, 2023), can offer researchers a comprehensive overview of the science production, identifying opportunities for research and collaboration. This approach is essential for guiding strategic decisions in Research and Development, identifying emerging technological trends, evaluating scientific and technological performance, and efficiently allocating resources in the industry (X. Liu et al., 2016).

In this context, this study aimed to analyze the structure, dynamics, and research trends from scientific publications with the extraction of phenolic compounds from the genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* species. The research investigated the temporal evolution of scientific production in this area, identifying periods of higher and lower research activity, the most prolific authors, and their temporal production dynamics. Additionally, it sought to identify the studies with the most significant impact on the scientific community, map the relationships between authors, keywords, and journals, and highlight areas of research concentration and relevant scientific sources. Analyses of recurring keywords and co-occurrence networks were conducted to reveal emerging themes, topics of interest, and promising research directions. Finally, the study aimed to elucidate researchers' interactions, identify collaboration networks, and recognize institutions and countries contributing significantly to advancing knowledge in this field.

2. Material and Methods

2.1 Database Search and Scientific Article Selection

Scientific articles were collected on April 21, 2024, from the multidisciplinary databases Scopus (<https://www.scopus.com/>) and Web of Science Core Collection (<https://www.webofscience.com/>). The search strategy employed was: "extraction AND (phenolic OR polyphenols OR bioactive) AND (*Eugenia* OR *Myrciaria* OR *Plinia*)," limited to the field of "title, abstract, and keywords," without temporal constraints. Only peer-reviewed scientific journals were considered, while technical reports, conference abstracts, reviews, books, and book chapters were excluded to ensure the inclusion of complete, peer-reviewed studies without redundancy. Initially, a preliminary screening was conducted by manually assessing article titles and abstracts to remove duplicates and papers outside the research scope. This involved excluding studies involving species not belonging to the genera *Eugenia*, *Myrciaria*, or *Plinia*, such as *Eugenia aromatica* from the genus *Syzygium*. Subsequently, articles were evaluated against specific criteria. Studies on solvent efficacy, extraction methods, conditions, variables, equipment parameters, optimization, modeling, and in silico solvent selection were included. Exclusion criteria comprised studies focusing on other compound classes, such as carotenoids, pectin, DNA, and seed oil. Articles primarily addressing biological activities or

compound quantification using high-performance liquid chromatography were omitted.

The final dataset consisted of 69 publications, exported as complete database records. The entire process of article identification, screening, and inclusion is illustrated in the flowchart from Fig. 01.

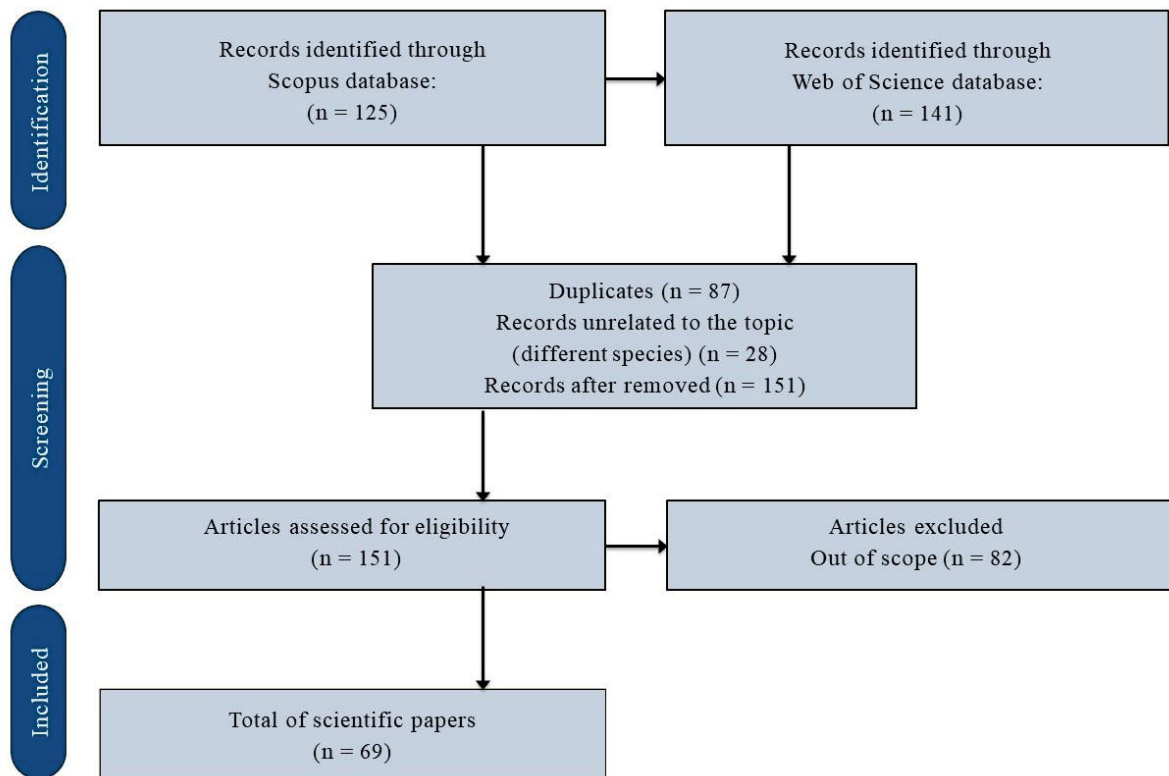


Fig. 1 Flow diagram adapted from PRISMA (2020) (Page et al., 2022) for identification, screening, and inclusion of articles for scientometric analysis.

2.2 Scientometric Analysis

Descriptive analyses and scientific mapping were conducted using the Bibliometrix 4.1.3 package (Aria & Cuccurullo, 2017) within the R software environment version 3.4.1 (R Development Core Team, 2023). The analysis included determining annual growth rates of publications, temporal distribution (2010-2024), author count, single-authored publications, average co-authors per document, and international collaborations. The authors' productivity congruence with Lotka's Law was assessed (Lotka, 1926). The top 10 authors' productivity dynamics (2010-2024) and the ten most cited documents were examined. A Sankey Diagram visually elucidated the scientific community's structure, integrating top authors, keywords, and journals

(Schmidt, 2008). The top 10 journals with the highest publication frequency were also determined, alongside evaluating journal productivity data compliance with Bradford's Law of Scatter (Bradford, 1934). A word cloud showcased the 20 most recurrent keywords (appearing at least twice in the documents). Before analysis, a list of synonyms was incorporated into the software to group similar terms under a single concept, such as "jabuticaba skin" and "jabuticaba peel," and "anthocyanins" and "anthocyanin.". Finally, the most relevant affiliations and countries responsible for scientific production were identified. The classification of research areas related to the extraction of phenolic compounds from species of the genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* was conducted using analytical methods available within the Scopus database.

The VOSViewer software was employed to generate two types of maps: one depicting keyword co-occurrence and another illustrating co-authorship networks. To enhance semantic clarity, a predefined list of synonyms was integrated into the software, consolidating similar terms into unified concepts. Default settings were applied for both analyses, with a minimum threshold of two occurrences required for keywords. Additionally, the software utilized the synonym list to ensure consistent identification of authors across publications, employing default parameters and including authors with at least one publication in the analyses.

3. Results and Discussion

3.1 Temporal Trends in Publication and Authorship

This study aimed to map scientific production regarding phenolic compound extraction from genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* plants. Out of 266 studies screened, 69 met the inclusion criteria (Appendix A). The research in the field dates back to 2010 with the first publication being: "Extraction of antioxidant compounds from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) skins: yield, composition, and economic evaluation" in the *Journal of Food Engineering* (Santos et al., 2010). This study investigated ultrasonic pretreatment before solvent extraction for phenolic compound retrieval. Recent studies emphasize eco-friendly alternatives to conventional solvents and methods (Albuquerque et al., 2023; Bueno et al., 2024; Ueda et al., 2024). The temporal distribution analysis (Fig. 2a) reveals significant fluctuations, with an annual growth rate of 5.08%. Particularly, 2020 and 2023 had the highest publication counts, each with 12 articles, while no publications were recorded in 2013. These

fluctuations may be attributed to diverse factors, including financial resource variations, advances in related fields, discovery of new applications, and research methodology improvements. It should be noted that the lowest production value observed in 2024 cannot be directly compared due to data representing only four months of the year.

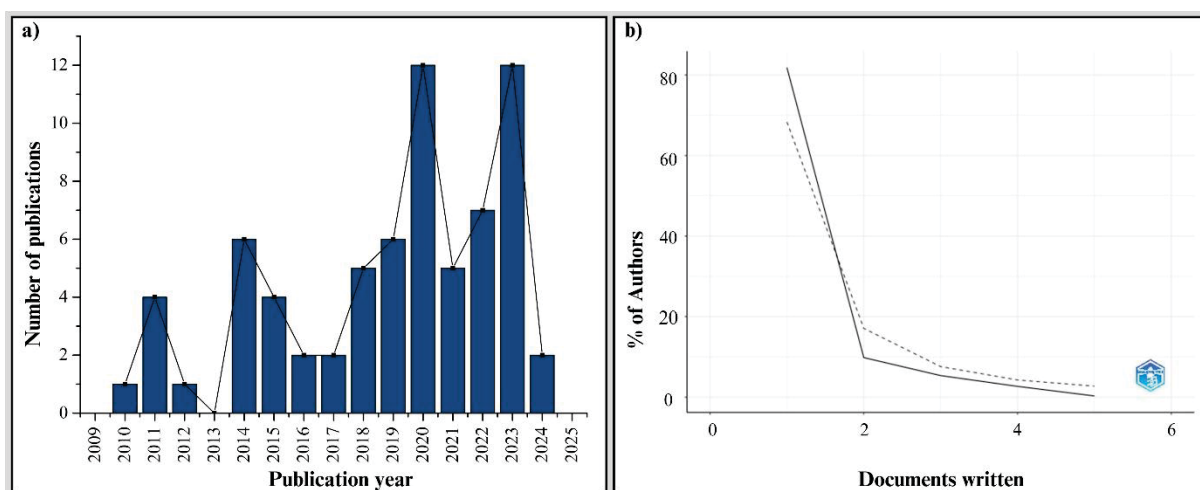


Fig. 2 a) Annual number of publications from 2010 to 2024 (until 04/21/2024). b) Author's productivity through Lotka's Law.

The recent increase in publications can be attributed to several factors. For instance, the growing global demand for natural products is driving research into phenolic compounds from nature. Consumers are changing their dietary habits, preferring natural ingredients over synthetic additives to enhance food attributes like shelf life, color, and flavor (Phytochemicals Market, 2023). The global phytochemicals market saw significant growth, with an Annual Compound Growth Rate of approximately 8.5% in 2023, reaching a commercial value of around US\$ 7 million (Phytochemicals Market, 2023). Another factor is the growing amount of evidence demonstrating the beneficial properties of phenolic compounds, leading to renewed interest in their extraction and analysis. Both *in vitro* and *in vivo* studies have highlighted the health benefits associated with diets rich in phenolic compounds, which are strongly linked to reducing the risk of chronic diseases (Li et al., 2023). Particularly within the Myrtaceae family, there has been a notable increase in the number of articles indexed in the Scopus database documenting the biological activities of species belonging to this family in recent years, with a significant peak observed in the graph from 2019 onwards (Fig.1a). This suddenly increasing in publications is also

attributable to a growing consciousness surrounding biodiversity conservation, propelled by the sustainable utilization of plant resources. Researchers in Food Engineering have developed innovative methods for efficiently extracting phenolic compounds from plant sources (da Rosa et al., 2022; F. O. Farias et al., 2023; L. M. Rodrigues et al., 2021; Sezer Okur & Okur, 2024; Ueda et al., 2022). These methods not only enhance compound yield and purity but also prioritize environmentally friendly extraction processes, such as employing green solvents and minimizing energy consumption. Concurrently, there is a growing focus on recovering phenolic compounds from food waste to alleviate both environmental and economic impacts, thereby recognizing these wastes as valuable sources of bioactive compounds (Albuquerque et al., 2023; Chang et al., 2022; Nirmal et al., 2023; Paludo et al., 2019; L. M. Rodrigues et al., 2021).

Identifying key authors in these studies is crucial for understanding the primary contributors in the field. Among the 338 authors analyzed, none had a single authorship on a document. On average, each document featured six co-authors, with roughly 23.19% of collaborations being international. Evaluating authors' productivity (Fig. 2b) reveals an uneven distribution, consistent with Lotka's Law (Lotka, 1926), which indicates that a small number of authors produce the majority of publications while most contribute minimally.

The majority of authors (275, or 81.8%) authored only one document. A smaller group (33) contributed to two papers, about 9.8%. Additionally, 18 authors contributed to three documents, comprising approximately 5.4% of the cohort. A minority subset contributed to four (9 authors, roughly 2.7%) and five (1 author, about 0.3%) documents.

The researchers Santos D.T., Veggi P.C., and Meireles M.A.A. were pioneers in investigating the extraction of phenolic compounds from the *Plinia* genus. Meireles M.A.A.'s current scientific production remains prominent in this area. Among the ten most prolific authors identified (Fig. 3), Madroga G.S. published five articles between 2020 and 2023. The average citations per year indicate the ongoing relevance of the authors' work. For instance, Meireles M.A.A., Granato D., and Furtado M. have higher average citations per year (13.8, 19.2, and 19.2, respectively).

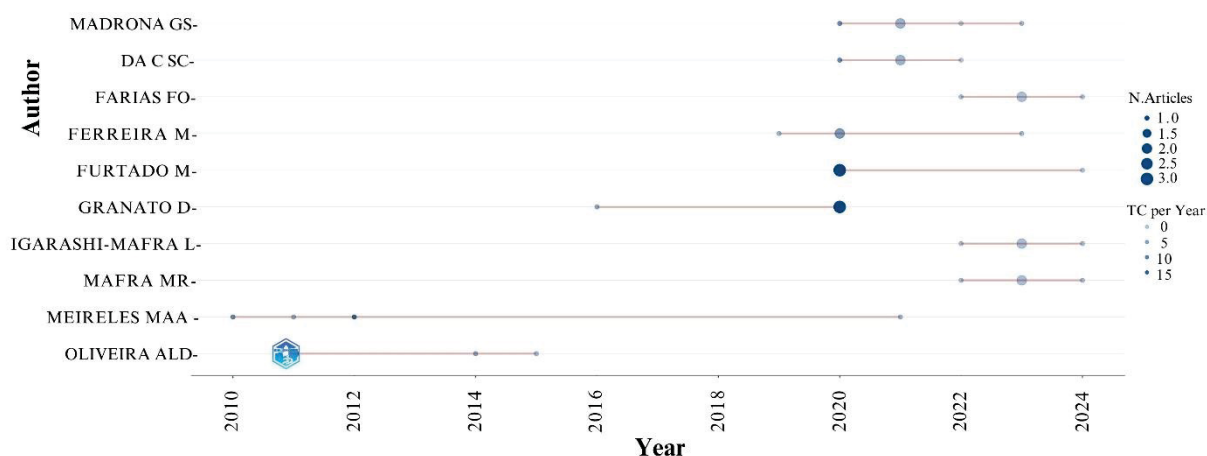


Fig. 3 10 top authors' production (number of publications) over time (2010-2024). The line represents the author's timeline production, and the circle size is proportional to the number of articles. The color intensity is proportional to the average number of citations in the corresponding year (the sum of the average of each article).

Assessing the author's relevance, productivity, and impact is essential as it provides insights into their contributions, guides decisions on collaboration and funding, and evaluates their position in the scientific community. Table 1 lists the most globally cited documents on phenolic compound extraction from the mentioned species. The article by Santos et al. (2012) leads with 180 citations, followed by Rodrigues et al. (2015) with 155, both with consistent citations over the years. Considering the time since publication, Benvenuti et al. (2020) has the highest index (14.40 citations/year), followed by Machado et al. (2017) with 13.75 citations/year, indicating a significant initial impact of these articles. *Journal of Food Engineering* (impact factor 5.5) and *The Journal of Supercritical Fluids* (impact factor 3.9) have the most publications, indicating their relevance to the field. This suggests that both journals are more adherent to research on compound extraction from the Myrtaceae family and, therefore, could be a good choice for authors in the field. The analysis of the most cited articles underscores the importance of research and development in extracting bioactive compounds from agro-industrial residues through efficient and economically viable methods.

Table 1 – Most globally cited documents.

Authors	Journal	DOI	Total Citations	TC per Year*
(Santos et al., 2012)	J. Food Eng.	10.1016/j.jfoodeng.2011.08.022	180	13,85
(S. Rodrigues et al., 2015)	Ind. Crop. Prod.	10.1016/j.indcrop.2015.02.059	155	15,50
(Santos et al., 2010)	J. Food Eng.	10.1016/j.jfoodeng.2010.06.005	123	8,20
(Machado et al., 2017)	Food Chem.	10.1016/j.foodchem.2017.03.060	110	13,75
(Haminiuk et al., 2014)	J. Food Sci. Technol.	10.1007/s13197-012-0759-z	108	9,82
(Martinez-Correa et al., 2011)	J. Supercrit. Fluids	10.1016/j.supflu.2010.09.001	88	6,29
(Vieitez et al., 2018)	J. Supercrit. Fluids	10.1016/j.supflu.2017.09.025	82	11,71
(Benvenuti et al., 2020)	J. Mol. Liq.	10.1016/j.molliq.2020.113761	72	14,40
(Garmus et al., 2014)	J. Supercrit. Fluids	10.1016/j.supflu.2013.11.014	71	6,45
(Rocha et al., 2011)	Rev. Bras. Frutic.	10.1590/S0100-29452011000400021	65	4,64

* Indicates how many citations, on average, documents have received each year since their publication.

3.2 Trends in Journals and Researches

Fig. 4 illustrates the connections among the top 10 authors, keywords, and journals in the study of phenolic compound extraction from species of the genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* (Fig. 4). This visualization helps one understand the field's structure and trends and identify collaborations and experts (Schmidt, 2008).

Analyzing interactions between keywords and journals reveals leading dissemination platforms within each subfield, aiding researchers in selecting where to conduct and publish their research. For instance, keyword analysis can indicate specific areas of interest and specialization. As expected, leading authors commonly focus on keywords such as "phenolic compounds," "antioxidants," "antioxidant activity," and "bioactive compounds," indicating the intrinsic relationship between phenolic compounds and their antioxidant and bioactive properties.

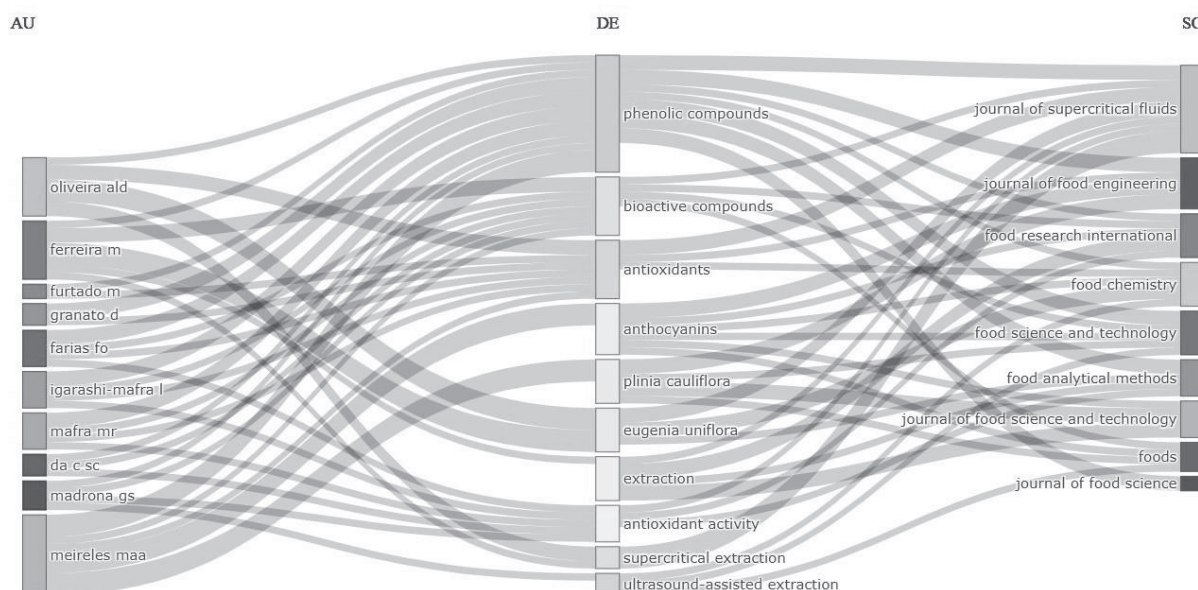


Fig. 4 Three-field plot of scientific community organization with the 10 top authors (AU), Keywords (DE), and journals (SO) from the papers dataset.

The broader term "bioactive compounds" associated with authors Ferreira M., Farias F.O., Igarash-Mafra L., Mafra M.R., Da Costa S.C., Madrona G.S., and Meireles M.A.A., encompasses not only phenolic compounds, but also several other biologically active compounds, including carotenoids. This may suggest that these authors address extracting a broader range of compounds beyond phenolic. Articles with this approach have been published in journals such as the *Journal of Supercritical Fluids*, *Food Research International*, *Food Science and Technology*, and *Foods*.

The term "anthocyanins," referring to a specific subset of phenolic compounds known for their antioxidative properties (Machado et al., 2017), has sparked increasing interest in research (Fig. 4). Researches in this area are mainly associated with Meireles M.A.A. and it has been documented in the journals *Food Engineering*, *Food Research International*, *Food Science and Technology*, *Journal of Food Science and Technology*, *Foods*, and *Food Chemistry*.

Two species were identified as the most studied and explored within the dataset. The first one, "*Plinia cauliflora*", suggests a growing interest in this fruit rich in anthocyanins, with studies also associated with the researcher Meireles M.A.A. and published in the *Journal of Food Engineering*, *Food Science and Technology*, *Journal of Food Science and Technology*, and *Foods*. The second one, "*Eugenia uniflora*"

attracts attention, particularly associated with Oliveira A.L.D. and Ferreira M., whose research is published in the *Journal of Supercritical Fluids*, *Food Analytical Methods*, and *Food Chemistry*.

Extraction techniques are represented by "Supercritical extraction" and "ultrasound-assisted extraction" keywords (Fig. 4). Novel methods have emerged to diminish organic solvents and operational time and enhance extract yield and quality (Klein, Carvalho, et al., 2021). Ultrasonic extraction is effective for unstable compounds like phenolics (L. M. Rodrigues et al., 2021), utilizing cavitation to disrupt cells and improve extraction efficiency compounds (Abbasi-Parizad et al., 2022; Naik et al., 2021). *Food Science and Technology*, *Foods*, and *Food Chemistry* are key resources on this topic, linked to author Madrona G.S. Supercritical fluid extraction is safe due to its non-flammable, non-toxic solvents (Klein, Carvalho, et al., 2021). Its efficacy is due to solvent properties: nearly liquid density, high solubility, low viscosity, and high diffusivity (Klein et al., 2018). The *Journal of Supercritical Extraction* is a key publication in this field. Among the top 10 authors, only Oliveira A.L.D and Ferreira M. stand out in the supercritical extraction.

Bradford's Law of Scattering (Bradford, 1934) was employed to examine the distribution of scientific literature among journals. This method guides identifying key journals, aiding research focus and literature acquisition for comprehensive coverage. This law posits that a small group of scientific journals contains the majority of relevant articles on a topic, followed by a more significant number of secondary journals with a proportional amount of articles (Patra et al., 2006). By categorizing journals into three groups, each representing roughly one-third of all articles, the number of journals in each group will be proportional to $1:n:n^2$.

Three journal zones emerged: Zone 1, with nine journals and 24 articles; Zone 2, with 20 journals and 23 articles; and Zone 3, with 22 journals and 22 articles (Appendix B). Although a significant concentration in a small group of journals in Zone 1 was observed, the data did not precisely conform to Bradford's law, as the distribution of journals among these zones was less uneven than predicted by the law. Non-conformity with Bradford's law may be attributed to the interdisciplinary nature of research on phenolic compounds, with different subfields finding prominence in specific journals. An analysis of the Scopus database revealed the involvement of multiple areas in studies on the extraction of phenolic compounds from species of the genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia*, including Agricultural and

Biological Sciences (30.8%), Chemistry (19.6%), Chemical Engineering (10.5%), Biochemistry (6.3%), Pharmacology (4.9%), Engineering (4.2%), Physics and Astronomy (4.2%), Environmental Sciences (3.5%), Immunology and Microbiology (3.5%), Multidisciplinary (2.8%), and others (9.8%). Additionally, a relatively restricted number of journals (51) was considered. A broader sample could result in a distribution more congruent with Bradford's Law. Despite the deviation, Bradford's Law is a valuable tool for identifying relevant journals. Zone 1, with its high concentration of articles, is a good starting point for research and publications on the topic. The journals that are part of this zone are Food Chemistry (5 articles), Journal of Supercritical Fluids (4 articles), Journal of Food Science and Technology (3 articles), Anais da Academia Brasileira de Ciências (2 articles), Food Analytical Methods (2 articles), Food Research International (2 articles), Food Science and Technology (2 articles), Foods (2 articles), Journal of Food Engineering (2 articles) and Journal of Food Science (2 articles).

3.3 Scientific Field Structure

The scientific structure of the field was revealed throughout the word cloud and keyword network (Fig. 5).

The word cloud revealed the 20 most common keywords in phenolic compound extraction from *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* species (Fig. 5a). This visual representation forms a conceptual map, highlighting the main themes in the field and offering insights for future research. Some terms highlight specific focuses, while the absence of others suggests a lack of research and scientific areas for further studies. Studies primarily focus on extracting "bioactive compounds" (11 occurrences) and "phenolic compounds" (24 occurrences) from these genera. Keywords like "antioxidants" (11 occurrences) and "antioxidant activity" (8 occurrences) underscore the significance of these terms, indicating the potential of these compounds in food, nutraceutical, and pharmaceutical applications due to their antioxidant properties. Additionally, the prominent presence of "*Eugenia pyrifolia*" (uvaia) (4 occurrences), "*Eugenia uniflora*" (pitanga) (8 occurrences), "*Myrciaria dubia*" (camu-camu) (3 occurrences), and "*Plinia cauliflora*" (jaboticaba) (10 occurrences) indicates the focus on these species as promising sources of phenolic compounds. This may be attributed to several factors, such as the availability of plant material, prior knowledge of the compounds present in these four species, and promising results from previous

studies. However, the absence of other species in the word analysis suggests the need to explore the broader diversity of these genera. Each species may offer a unique profile of phenolic compounds with distinct biological activities. Furthermore, sustainable exploration of plant biodiversity plays a fundamental role in promoting socioeconomic development and environmental conservation.

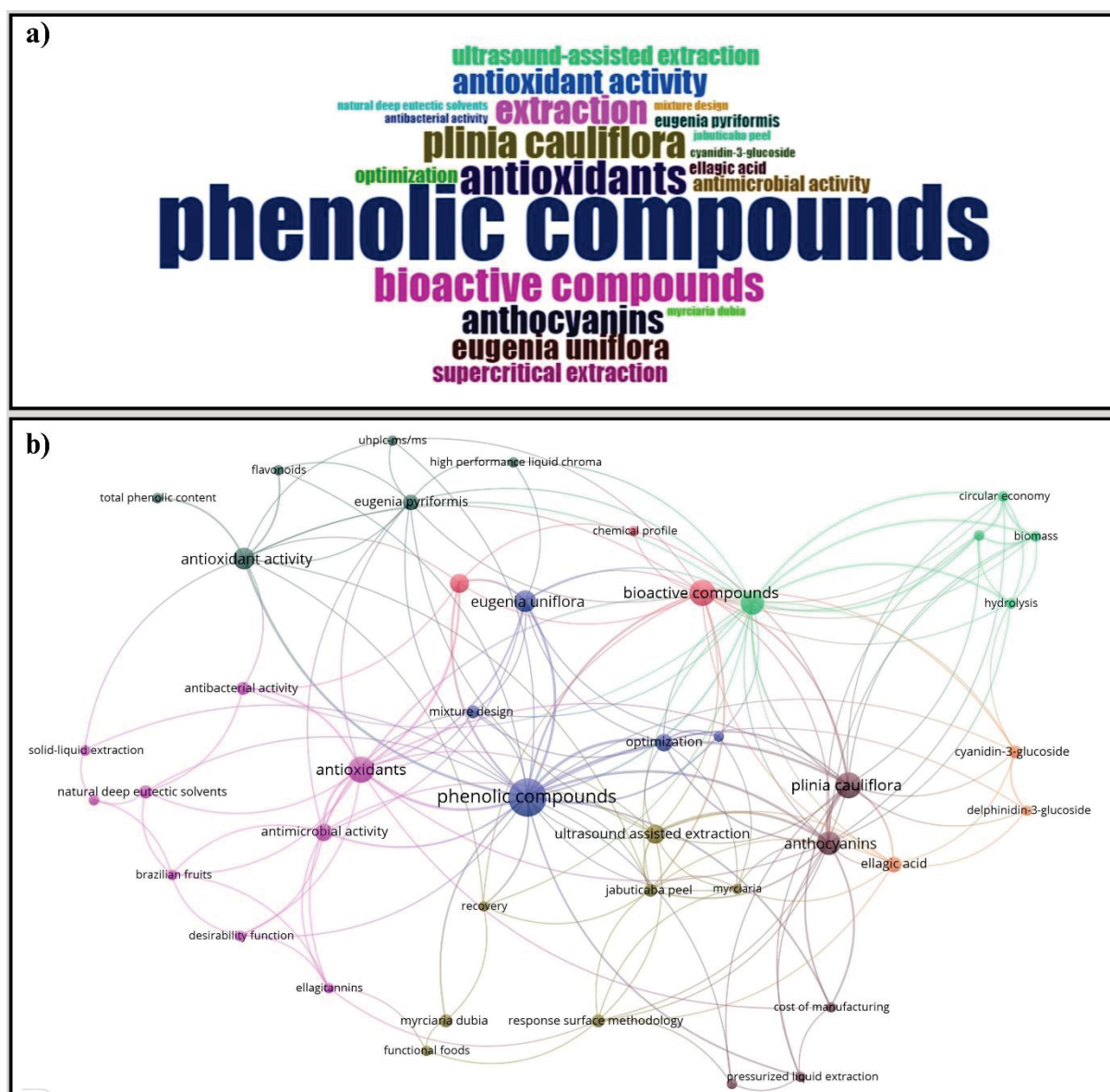


Fig. 5 a) Word cloud of 20 most frequent keywords appearing at least twice in documents, using Bibliometrix. b) The co-occurrence network of the 43 most frequent keywords. Each node represents a keyword, and the thickness between nodes represents the strength of the relationship between keywords, determined by the frequency they appeared together in publications.

Regarding phenolic compounds, the emphasis on "anthocyanins" (9 occurrences), "cyanidin-3-glucoside" (3 occurrences), and "ellagic acid" (4 occurrences) highlights a focus on these bioactive compounds or their prevalence in the extracts.

Anthocyanins are valued for food coloring and potential health benefits (Bueno et al., 2024), with diverse biological activities, including anti-inflammatory, anticancer, antimutagenic, and antiviral properties (Paludo et al., 2019). Cyanidin-3-glucoside, an abundant anthocyanin, exhibits antimicrobial, cardioprotective, and hepatoprotective effects (Zhao et al., 2020) and is often used as a reference standard to measure a sample's total anthocyanins. Ellagic acid shows promise in treating chronic inflammatory diseases (Resende et al., 2023). Studies demonstrate its effectiveness in protecting against diabetic nephropathy (AlTamimi et al., 2021), preventing arrhythmias, and regulating post-myocardial infarction lipid profile in rats (Kannan & Quine, 2013), as well as antiviral activity in HPV cervical intraepithelial neoplasia (Le Donne et al., 2017). This suggests a significant interest in the therapeutic potential of these compounds.

Interest in the antimicrobial applications of phenolic compounds is evidenced by terms such as "antimicrobial activity" (5 occurrences) and "antibacterial activity" (3 occurrences). Exploring phytochemicals with antimicrobial activity opens new perspectives for developing functional foods, natural preservatives, and new packaging. The prevalence of techniques such as "supercritical extraction" (6 occurrences) and "ultrasound-assisted extraction" (6 occurrences), already mentioned, denotes a leaning towards non-traditional methods in the extraction of phenolic compounds. Adopting these more ecological approaches assists in mitigating the environmental impact in the food, pharmaceutical, and nutraceutical industries.

In the realm of sustainable extraction practices, "jabuticaba peel" (3 occurrences) (jabuticaba - the common name of *P. cauliflora*) and "natural deep eutectic solvents" (3 occurrences) stand out. Utilizing jabuticaba peel as a phenolic source suggests efforts to minimize food industry waste disposal and loss. Meanwhile, natural deep eutectic solvents offer eco-friendly alternatives to conventional solvents, promising biodegradability, renewability, and biocompatibility (O. A. Souza et al., 2022). These solvents consist of a hydrogen bond acceptor (HBA) associated with a hydrogen bond donor (HBD) (Benvenutti et al., 2020).

In addition, the identification of the terms "optimization" (5 occurrences) and "mixture design" (3 occurrences) indicates the application of statistical methods to improve extraction efficiency. Optimization is the key to refining knowledge and optimizing the process of extracting phenolic compounds, adjusting various variables

such as time, temperature, and material concentrations to maximize extraction efficiency (Bezerra et al., 2020). Different plant materials may necessitate specific processing parameters for optimal yields (Albuquerque et al., 2023). Mixture design planning is essential to maximize the extractive efficiency of solvent systems (de Almeida et al., 2023).

Moreover, the VOSviewer software was used to generate a co-occurrence network map of author keywords to better understand and highlight the areas of research concentration in the field. A total of 186 author keywords were identified, composing the network in which each node in the map represents a keyword, sized by its frequency in the documents. Edges between nodes denote relationships, with thickness indicating co-occurrence frequency. Keywords are grouped into eight clusters based on interconnection and co-occurrence patterns Fig. 5b. This analysis offered insights into the thematic structure of phenolic compound extraction from plant parts of genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia*, showcasing diverse themes and approaches.

Cluster 1 (pink) includes nine nodes with 32 occurrences. It focuses on the antibacterial, antimicrobial, and antioxidant properties of phenolic compounds extracted from Brazilian fruits. Research in this cluster is concentrated on green solvents, such as natural deep eutectic solvents, which enable more sustainable extractions.

Cluster 2 (dark yellow) consists of 7 nodes, totaling 21 occurrences, and is predominantly associated with the genus *Myrciaria*, particularly *Myrciaria dubia*. Also noteworthy is the inclusion of "jabuticaba peel" (previously classified as belonging to the genus *Myrciaria* and updated into the *Plinia*), highlighting the interest in valorizing agro-industrial residues for obtaining relevant compounds. This grouping emphasizes optimizing extraction processes, employing ultrasound-assisted and response surface methodology methods to recover phenolic compounds and their potential application in functional foods.

Cluster 3 (dark green) consists of 6 nodes and 20 occurrences. This grouping is dedicated to extracting, quantifying, and evaluating the antioxidant activity of phenolic compounds, such as flavonoids, focusing on *Eugenia pyriformis*. Analytical techniques such as High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) and Ultra-High-Performance Liquid Chromatography (UHPLC) characterize the phenolic compounds obtained.

Cluster 4 (bright green) consists of five nodes and 17 occurrences. This group addresses plant biomass as a source of phenolic compounds. Agro-industrial by-products are employed as biomass in fermentation for the production of biofuels and bioenergy, with biomass hydrolysis into sugars being an essential process to promote microbial degradation during fermentation and increase product yield (Barroso, da Rosa, et al., 2022; Barroso, Sganzerla, et al., 2022). In this context, techniques are employed to simultaneously carry out hydrolysis and biomass extraction, aiming to recover sugars, organic acids, and anthocyanins from fruit by-products in a circular economy model (Barroso, da Rosa, et al., 2022; Barroso, Sganzerla, et al., 2022).

Cluster 5 (dark blue) consists of five nodes, totaling 42 occurrences, and is centered on optimizing the extraction of phenolic compounds from the *Eugenia uniflora*. For this purpose, experimental design and mixture planning methods are employed to maximize the efficiency of the extraction process. This strategic approach allows for the systematic evaluation of various factors and their interactions, ultimately leading to improved yield and quality of the extracted phenolic compounds.

Cluster 6 (dark plum) encompasses five nodes and 26 occurrences. It emphasizes sustainable extraction techniques like ultrasound and pressurized liquid extraction and economic considerations in extract production, particularly anthocyanins in *Plinia cauliflora*.

Cluster 7 (orange), characterized by fewer connections, includes only three nodes and nine occurrences, focusing on the chemical profile of species, particularly ellagic acid and other phenolic compounds like delphinidin-3-glucoside and cyanidin-3-glucoside. Finally, cluster 8 (red) consists of 3 nodes and records 19 occurrences. Supercritical extraction is addressed as a technique for obtaining bioactive compounds, emphasizing studying their chemical profiles.

3.3 Collaboration Networks

The scientific community and the relationship between authors revealed them grouped into eight clusters based on collaborative interactions, each representing authors who frequently collaborate, possibly in specific and similar research areas (Fig. 6a). It is recognized that co-authorship networks are relevant for understanding and mapping scientific production (Jaramillo et al., 2023). Some of the initially considered 338 authors showed limited connections and were excluded, focusing on

81 representative authors, forming the largest collaborative network. Nodes represent authors, sized by their publication count, and edge thickness indicates collaboration frequency.

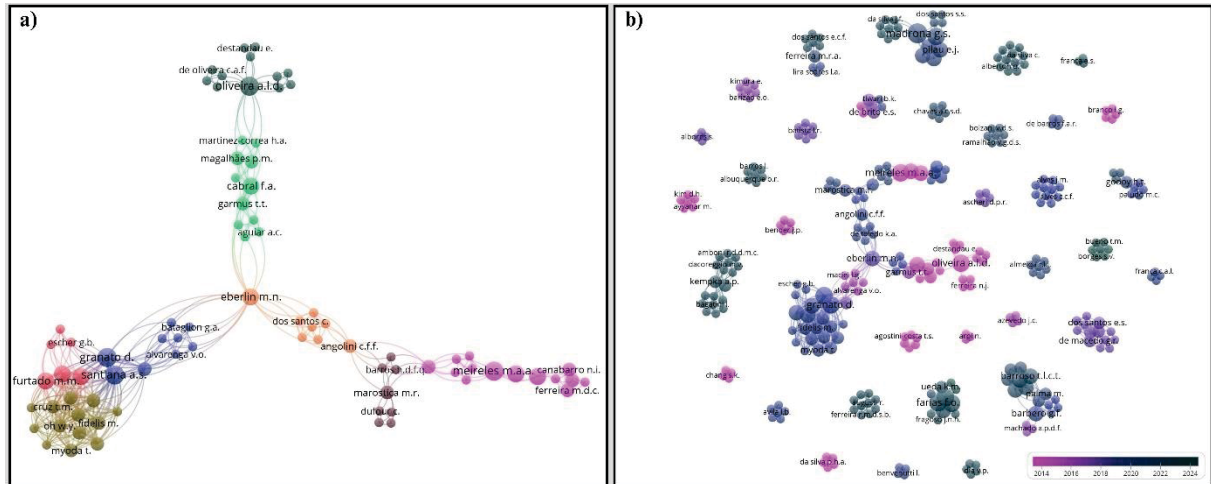


Fig. 6 a) The structure map of the authors' collaboration network. b) Mapping of Collaboration Network between Authors and Isolated Research Communities.

Cluster 1 (pink) is the largest in terms of authors, composed of 14 authors with moderate connections (average of 5.6 per author). Most of these authors have recently published around 2020-2021. Meireles M.A.A. is the most prominent author, with four articles and 352 citations, standing out in the research field. Santos D.T. has the highest average citations per article (115), indicating the quality of their research. Authors from this Cluster produced the most cited document in the area (Santos et al., 2012). Authors in Cluster 2 (burnt yellow) have considerable connections (average of 17.3 per author) and published on average in 2020, demonstrating high collaboration among them. Cluster 3 (dark green) has fewer connections (an average of 4.8 per author) and was published in 2014-2015. Oliveira A.L.D. stands out with four articles, 198 citations, and 16 connections, evidencing its prominence.

Authors in Cluster 4 (bright green) have moderate to high connections (average of 6.6) and considerable citations. Cabral F.A. stands out with three articles and 167 citations.

Cluster 5 (blue) also shows high collaboration (average of 14.7 per author), with Sant'ana A.S. and Granato D. standing out with four articles and 127 citations. This cluster's average publication period is from 2016 to 2019. Cluster 6 (dark plum)

consists mainly of authors with moderate connections (average of 5 per author) and recent publications (2019-2021), with relatively low citations.

In Cluster 7 (orange), authors have moderate connections, with exceptions having more connections. They published, on average, in 2019-2020. Eberlin M.N. has more works (3) and connections (22).

Cluster 8 (red), with the smallest number of authors, has many connections and publications on average in 2020. Azevedo L. and Furtado M.M. have three articles, 21 connections, and 96 citations.

Some authors, such as Eberlin M.N., Granato D., and Sant'ana A.S., promote interdisciplinary collaboration and knowledge transfer between clusters, essential for high-quality, innovative research. Despite the challenges, the benefits of this collaboration are clear and should be encouraged by academic and research institutions.

A second analysis considered authors outside the central collaboration axis, encompassing 338 authors in documents and considering temporality (Fig. 6b). Smaller communities of isolated researchers and solo authors were identified, highlighting the challenge of intergroup collaboration in the area. Additionally, some smaller collaboration networks were observed, producing more recent research compared to the central collaboration axis, detaching as prominent authors in the area the author's Madrona G.S., da Costa S.C., and Farias F.O. These smaller communities tend to be more active and produce recent research in comparison to others authors, in part due to less bureaucracy and more efficient communication among their members, which facilitates decision-making and accelerates both research and publication processes. Moreover, it is important to highlight that the first publication in the field was in 2010, therefore the area is being explored and arising recently. This also can justify the high number of isolated small research groups (Fig. 6b). Integrating these groups into an expanded collaborative network can enrich research quality with diverse expertise and perspectives. A broader network would also facilitate sharing resources, including specialized equipment, databases, and funding, empowering researchers' joint efforts to generate significant discoveries and increase research visibility.

Analysis of most relevant affiliations reveals that research on phenolic compound extraction from *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* genera is primarily led by the following institutions: State University of Campinas (Brazil), followed by the State University of

Maringá (Brazil), University of São Paulo (Brazil), State University of Ponta Grossa (Brazil), and São Paulo State University (Brazil), with other institutions contributing on a smaller scale.

Brazil stands out as a leader in scientific production regarding the extraction of phenolic compounds from *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* genera, with approximately 75% of all publications. This leadership aligns with the vast biodiversity of these species in its territory. In contrast, countries such as France, Finland, Portugal, Spain, and Colombia have a more modest scientific production in this domain, possibly attributable to the lower diversity of these species in their habitats, more restricted investment in research in this specific field, and prioritization of other areas of study. Countries like India, Indonesia, Ireland, and Malaysia also report at least one scientific contribution, suggesting a global interest in extracting phenolic compounds from these plant genera. This interest may be explained by the increasing awareness of the health benefits associated with such compounds and the growing interest in natural sources of them.

8. Conclusion

The study sought to investigate the temporal evolution of scientific production in this area, identifying periods of higher and lower research activity, the most prolific authors, and their temporal production dynamics. Additionally, efforts were made to identify the studies with the most significant impact on the scientific community, map the relationships between authors, keywords, and journals, and highlight areas of research concentration and relevant scientific sources

The study provided the structure, dynamics, and research trends in extracting phenolic compounds from the genera *Eugenia*, *Myrciaria*, and *Plinia* through a scientometric approach. The growth of publications, particularly in recent years, was attributed to the increasing global demand for natural products and the health benefits of phenolic compounds. The research in the field focused on specific species such as *Eugenia pyriformis*, *Eugenia uniflora*, *Myrciaria dubia*, and *Plinia cauliflora*, as well as non-traditional extraction methods like supercritical and ultrasound-assisted extraction, with an emphasis on sustainability and the use of eco-friendly solvents.

The scientometric analysis highlighted Brazil as a leader in scientific production in this field, underscoring the importance of collaboration among authors to enhance

the quality and impact of research. Despite the recent emergence of studies on phenolic compound extraction from these genera, the exploration of species within each genus remains limited, considering the diverse range of species available in the Myrtaceae family. It is recommended that future studies broaden their scope to encompass a greater variety of species within this botanical family.

These insights provide a solid foundation for future investigations and practical applications in extracting phenolic compounds from these plant genera.

Acknowledgments

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001 and by the National Council for Scientific and Technological Development, Brazil [grant numbers 407877/2018-5 and 304722/2019-7]. A graphic abstract was created on BioRender.com (Agreement number: EX26SVXKUM).

Author contributions

Mariana Aguiar Cargnin: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Visualization; Writing — original draft; Writing — review & editing. **Katia Rezzadori:** Conceptualization; Supervision; Writing — review & editing. **Franciny Campos Schmidt:** Conceptualization; Supervision; Writing — review & editing.

References

- Abbasi-Parizad, P., Scarafoni, A., Pilu, R., Scaglia, B., De Nisi, P., & Adani, F. (2022). The recovery from agro-industrial wastes provides different profiles of anti-inflammatory polyphenols for tailored applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 996562. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.996562>
- Albuquerque, B. R., Pinela, J., Pereira, C., Mandim, F., Heleno, S., Oliveira, M. B. P. P., & Barros, L. (2023). Recovery of anthocyanins from *Eugenia spp.* fruit peels: a comparison between heat- and ultrasound-assisted extraction. *Sustainable Food Technology*, 2(1), 189–201. <https://doi.org/10.1039/d3fb00115f>
- AlTamimi, J. Z., AlFaris, N. A., Alshammari, G. M., Alagal, R. I., Aljabryn, D. H., Aldera, H., Alrafi, B. M., Alkhateeb, M. A., & Yahya, M. A. (2021). Ellagic acid protects against diabetic nephropathy in rats by regulating the transcription and activity of Nrf2. *Journal of Functional Foods*, 79, 104397. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104397>
- Amarowicz, R., & Pegg, R. B. (2019). Natural antioxidants of plant origin. *Advances in Food and Nutrition Research*, 90, 1–81. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.02.011>
- Amorim, A. C. L., Lima, C. K. F., Hovell, A. M. C., Miranda, A. L. P., & Rezende, C. M. (2009). Antinociceptive and hypothermic evaluation of the leaf essential oil and isolated terpenoids from *Eugenia uniflora* L. (Brazilian Pitanga). *Phytomedicine*, 16(10), 923–928. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2009.03.009>
- Antonelo, F. A., Rodrigues, M. S., Cruz, L. C., Pagnoncelli, M. G., Cunha, M. A. A. da, Bonatto, S. J. R., Busso, C., Wagner Júnior, A., & Montanher, P. F. (2023). Bioactive compounds derived from Brazilian Myrtaceae species: Chemical composition and antioxidant, antimicrobial and cytotoxic activities. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 48, 102629. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102629>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Barroso, T., da Rosa, R. G., Sganzerla, W. G., Castro, L. E. N., Maciel-Silva, F. W., Rostagno, M. A., & Forster-Carneiro, T. (2022). Hydrothermal pretreatment based on semi-continuous flow-through sequential reactors for the recovery of bioproducts from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel. *Journal of Supercritical Fluids*, 191, 105766. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105766>
- Barroso, T., Sganzerla, W., Rosa, R., Castro, L., Maciel-Silva, F., Rostagno, M., & Forster-Carneiro, T. (2022). Semi-continuous flow-through hydrothermal pretreatment for the recovery of bioproducts from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) agro-industrial by-product. *Food Research International*, 158, 111547. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111547>
- Benvenuti, L., Sanchez-Camargo, A. D. P., Zielinski, A. A. F., & Ferreira, S. R. S.

- (2020). NADES as potential solvents for anthocyanin and pectin extraction from *Myrciaria cauliflora* fruit by-product: In silico and experimental approaches for solvent selection. *Journal of Molecular Liquids*, 315, 113761. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113761>
- Bezerra, I. C. F., Ramos, R. T. de M., Ferreira, M. R. A., & Soares, L. A. L. (2020). Optimization strategy for extraction of active polyphenols from leaves of *Eugenia uniflora* Linn. *Food Analytical Methods*, 13(3), 735–750. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01691-5>
- Bradford, S. C. (1934). Sources of information on specific subjects. *Journal of Information Science*, 137, 85–86.
- Bueno, T. M., Queiroz, F., Santos, J. C. C. D., Furtado, M. L. B., Schiassi, M. C. E. V., Borges, S. V., & Figueiredo, J. A. (2024). Sequential extraction of anthocyanins and pectin from jabuticaba (*Plinia cauliflora*) peel: Peel pretreatment effect and ultrasound-assisted extraction. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 96(1), e20230174. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420230174>
- Chang, Y., Shi, X., He, F., Wu, T., Jiang, L., Normakhamatov, N., Sharipov, A., Wang, T., Wen, M., & Aisa, H. A. (2022). Valorization of Food Processing Waste to Produce Valuable Polyphenolics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(29), 8855–8870. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c02655>
- da Rosa, R. G., Sganzerla, W. G., Barroso, T. L. C. T., Buller, L. S., Berni, M. D., & Forster-Carneiro, T. (2022). Sustainable production of bioactive compounds from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*): A bibliometric analysis of scientific research over the last 21 years. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27, 100656. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100656>
- da Silva, A. P. G., Sganzerla, W. G., Jacomino, A. P., da Silva, E. P., Xiao, J., & Simal-Gandara, J. (2022). Chemical composition, bioactive compounds, and perspectives for the industrial formulation of health products from uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess – Myrtaceae): A comprehensive review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 109, 104500.
- da Silva, A. P. G., Spricigo, P. C., Purgatto, E., de Alencar, S. M., Sartori, S. F., & Jacomino, A. P. (2019). Chemical composition, nutritional value and bioactive compounds in six uvaia accessions. *Food Chemistry*, 294, 547–556. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.121>
- Dacoreggio, M. V., Santetti, G. S., Inácio, H. P., da Silva Haas, I. C., da Silva Monteiro Wanderley, B. R., Hoff, R. B., Freire, C. B. F., Kempka, A. P., & de Mello Castanho Amboni, R. D. (2024). Exploring the effects of gastrointestinal digestion on phenolic profile and antioxidant activity: A new perspective on the biological potential of infusion of *Eugenia pyriformis* Cambess leaves. *Measurement: Food*, 14, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2024.100167>
- Dallabona, I. D., de Lima, G. G., Cestaro, B. I., Tasso, I. de S., Paiva, T. S., Laureanti, E. J. G., Jorge, L. M. de M., da Silva, B. J. G., Helm, C. V., Mathias,

- A. L., & Jorge, R. M. M. (2020). Development of alginate beads with encapsulated jabuticaba peel and propolis extracts to achieve a new natural colorant antioxidant additive. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 1421–1432. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.256>
- Dalmagro, M., Pinc, M. M., Donadel, G., Tominc, G. C., Jacomassi, E., Lourenço, E. L. B., Gasparotto Junior, A., Boscarato, A. G., Belettini, S. T., Alberton, O., Prochnau, I. S., Bariccatti, R. A., Almeida, R. M. de, Rossi de Aguiar, K. M. F., & Hoscheid, J. (2023). Bioprospecting a Film-Forming System Loaded with *Eugenia uniflora* L. and *Tropaeolum majus* L. Leaf Extracts for Topical Application in Treating Skin Lesions. *Pharmaceuticals*, 16(8), 1068. <https://doi.org/10.3390/ph16081068>
- de Almeida, L. F., dos Santos, E. C., Machado, J. C., de Oliveira, A. M., Napoleao, T. H., Ferreira, M. R., & Soares, L. AL. (2023). Phytochemical profile, in vitro activities, and toxicity of optimized *Eugenia uniflora* extracts. *Boletim Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 22(1), 130–144. <https://doi.org/10.37360/blacpma.23.22.1.10>
- de Araújo, F. F., Neri-Numa, I. A., Farias, D. D. P., da Cunha, G. R. M. C., & Pastore, G. M. (2019). Wild Brazilian species of *Eugenia* genera (Myrtaceae) as an innovation hotspot for food and pharmacological purposes. *Food Research International*, 121, 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.018>
- de Souza, A. M., de Oliveira, C. F., De Oliveira, V. B., Betim, F. C. M., Miguel, O. G., & Miguel, M. D. (2018). Traditional Uses, Phytochemistry, and Antimicrobial Activities of *Eugenia* Species – A Review. *Planta Medica*, 84(17), 1232–1248. <https://doi.org/10.1055/a-0656-7262>
- de Souza, P. G., Toci, A. T., Mafra, M. R., Farias, F. O., & Igarashi-Mafra, L. (2023). Natural Extracts from *Eugenia brasiliensis* Lam Leaves to Improve the Shelf-Life of Fresh Tomatoes. *Waste and Biomass Valorization*, 14(4), 1293–1304. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01941-4>
- do Carmo, M. A. V., Fidelis, M., Sanchez, C. A., Castro, A. P., Camps, I., Colombo, F. A., Marques, M. J., Myoda, T., Granato, D., & Azevedo, L. (2020). Camu-camu (*Myrciaria dubia*) seeds as a novel source of bioactive compounds with promising antimalarial and antischistosomicidal properties. *Food Research International*, 136, 109334. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109334>
- Donado-Pestana, C. M., Moura, M. H. C., de Araujo, R. L., Santiago, G. de L., Barros, H. R. de M., & Genovese, M. I. (2018). Polyphenols from Brazilian native Myrtaceae fruits and their potential health benefits against obesity and its associated complications. *Current Opinion in Food Science*, 19, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.001>
- dos Santos de Moraes, P. G., da Silva Santos, I. B., Silva, V. B. G., dede Oliveira FariasAguiar, J. C. R., do Amaral Ferraz Navarro, D. M., de Oliveira, A. M., dos Santos Correia, M. T., Costa, W. K., & da Silva, M. V. (2023). Essential oil from leaves of *Myrciaria floribunda* (H. West ex Willd.) O. Berg has antinociceptive and anti-inflammatory potential. *Inflammopharmacology*, 31(6), 3143–3151.

<https://doi.org/10.1007/s10787-023-01300-2>

- Farias, D. d P., Neri-Numa, I. A., de Araújo, F. F., & Pastore, G. M. (2020). A critical review of some fruit trees from the Myrtaceae family as promising sources for food applications with functional claims. *Food Chemistry*, 306, 125630. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125630>
- Farias, F. O., Marques, C., Fragoso, J. N. H., Toci, A. T., Mafra, M. R., & Igarashi-Mafra, L. (2023). Optimization of green extraction of high-value components from *Eugenia uniflora* leaves: Thermal stability and in-vitro biological activity. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(4), 2189–2198. <https://doi.org/10.1002/cjce.24614>
- Fernandes, F. A. N., Fonteles, T. V, Rodrigues, S., de Brito, E. S., & Tiwari, B. K. (2020). Ultrasound-assisted extraction of anthocyanins and phenolics from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel: kinetics and mathematical modeling. *Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 2321–2328. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04270-3>
- Fernandes, I. de A. A., Maciel, G. M., Maroldi, W. V., Bortolini, D. G., Pedro, A. C., & Haminiuk, C. W. I. (2022). Bioactive compounds, health-promotion properties and technological applications of Jabuticaba: A literature overview. *Measurement: Food*, 8, 100057. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100057>
- Ferreira, O. O., Costa, V. G., Cruz, J. N., Kataoka, M. S. da S., Pinheiro, J. de J. V., Nascimento, L. D. do, Varela, E. L. P., Cascaes, M. M., Percário, S., Mali, S. N., Menezes, T. O. de A., de Oliveira, M. S., & Andrade, E. H. de A. (2024). Chemical Composition and In Vitro and In Silico Biological Activities of *Myrciaria tenella* (DC.) O.Berg (Myrtaceae) Essential Oil from Brazil. *Journal of Food Biochemistry*, 2024, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2024/2848736>
- Fidelis, M., do Carmo, M. A. V., da Cruz, T. M., Azevedo, L., Myoda, T., Miranda Furtado, M., Boscacci Marques, M., Sant'Ana, A. S., Inês Genovese, M., Young Oh, W., Wen, M., Shahidi, F., Zhang, L., Franchin, M., de Alencar, S. M., Luiz Rosalen, P., & Granato, D. (2020). Camu-camu seed (*Myrciaria dubia*) – From side stream to an antioxidant, antihyperglycemic, antiproliferative, antimicrobial, antihemolytic, anti-inflammatory, and antihypertensive ingredient. *Food Chemistry*, 310, 125909. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125909>
- Figueira, J. A., Porto-Figueira, P., Berenguer, C., Pereira, J. A. M., & Câmara, J. S. (2021). Evaluation of the Health-Promoting Properties of Selected Fruits. *Molecules*, 26(14), 4202. <https://doi.org/10.3390/molecules26144202>
- Garmus, T. T., Paviani, L. C., Queiroga, C. L., Magalhães, P. M., & Cabral, F. A. (2014). Extraction of phenolic compounds from pitanga (*Eugenia uniflora* L.) leaves by sequential extraction in fixed bed extractor using supercritical CO₂, ethanol and water as solvents. *Journal of Supercritical Fluids*, 86, 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.11.014>
- Gasparotto Junior, A., de Souza, P., & Lívero, F. A. dos R. (2019). *Plinia cauliflora* (Mart.) Kausel: A comprehensive ethnopharmacological review of a genuinely

- Brazilian species. *Journal of Ethnopharmacology*, 245, 112169. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112169>
- Haminiuk, C. W. I., Plata-Oviedo, M. S. V., de Mattos, G., Carpes, S. T., & Branco, I. G. (2014). Extraction and quantification of phenolic acids and flavonols from *Eugenia pyriformis* using different solvents. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2862–2866. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0759-z>
- Inada, K. O. P., Leite, I. B., Martins, A. B. N., Fialho, E., Tomás-Barberán, F. A., Perrone, D., & Monteiro, M. (2021). Jaboticaba berry: A comprehensive review on its polyphenol composition, health effects, metabolism, and the development of food products. *Food Research International*, 147, 110518. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110518>
- Jaramillo, A. M., Williams, H. T. P., Perra, N., & Menezes, R. (2023). The structure of segregation in co-authorship networks and its impact on scientific production. *EPJ Data Science*, 12(1), 47. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-023-00411-8>
- Kannan, M. M., & Quine, S. D. (2013). Ellagic acid inhibits cardiac arrhythmias, hypertrophy and hyperlipidaemia during myocardial infarction in rats. *Metabolism*, 62(1), 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2012.06.003>
- Klein, E. J., Carvalho, P. I. N., Náthia-Neves, G., Vardanega, R., Meireles, M. A. A., da Silva, E. A., & Vieira, M. G. A. (2021). Techno-economical optimization of uvaia (*Eugenia pyriformis*) extraction using supercritical fluid technology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 174, 105239. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105239>
- Klein, E. J., Johann, G., Silva, E. A. da, & Vieira, M. G. A. (2021). Mathematical modeling of supercritical CO₂ extraction of *Eugenia pyriformis* Cambess. leaves. *Chemical Engineering Communications*, 208(11), 1543–1552. <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1798936>
- Klein, E. J., Santos, K. A., Palú, F., Vieira, M. G. A., & da Silva, E. A. (2018). Use of supercritical CO₂ and ultrasound-assisted extractions to obtain A/B-amyrin-rich extracts from uvaia leaves (*Eugenia pyriformis* Cambess.). *Journal of Supercritical Fluids*, 137, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.02.019>
- Lama-Muñoz, A., & Contreras, M. del M. (2022). Extraction systems and analytical techniques for food phenolic compounds: A review. *Foods*, 11(22), 3671. <https://doi.org/10.3390/foods11223671>
- Le Donne, M., Lentini, M., Alibrandi, A., Salimbeni, V., Giuffrè, G., Mazzeo, F., Triolo, O., & D'Anna, R. (2017). Antiviral activity of Ellagic acid and *Annona Muricata* in cervical HPV related pre-neoplastic lesions: A randomized trial. *Journal of Functional Foods*, 35, 549–554. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.06.006>
- Li, W., Chen, H., Xu, B., Wang, Y., Zhang, C., Cao, Y., & Xing, X. (2023). Research progress on classification, sources and functions of dietary polyphenols for prevention and treatment of chronic diseases. *Journal of Future Foods*, 3(4), 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2023.03.001>

- Liu, X., Sun, Y., Xu, H., Jia, P., Wang, S., Dong, L., & Chen, X. (2016). *Combining Scientometrics with Patent-Metrics for CTI Service in R&D Decision-Making: Practices of National Science Library of CAS* (pp. 321–339). https://doi.org/10.1007/978-3-319-39056-7_17
- Liu, Y., & He, H. (2023). Scientometrics of scientometrics based on Web of Science core collection data between 1992 and 2020. *Information*, 14(12), 637. <https://doi.org/10.3390/info14120637>
- Lorenzo, J. M., Vargas, F. C., Strozzi, I., Pateiro, M., Furtado, M. M., Sant'Ana, A. S., Rocchetti, G., Barba, F. J., Dominguez, R., Lucini, L., & do Amaral Sobral, P. J. (2018). Influence of pitanga leaf extracts on lipid and protein oxidation of pork burger during shelf-life. *Food Research International*, 114, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.046>
- Lotka, A. J. (1926). The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 16(12), 317–323. <https://www.jstor.org/stable/24529203>
- Machado, A. P. D. F., Pereira, A. L. D., Barbero, G. F., & Martínez, J. (2017). Recovery of anthocyanins from residues of *Rubus fruticosus*, *Vaccinium myrtillus* and *Eugenia brasiliensis* by ultrasound assisted extraction, pressurized liquid extraction and their combination. *Food Chemistry*, 231, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.060>
- Martinez-Correa, H. A., Magalhães, P. M., Queiroga, C. L., Peixoto, C. A., Oliveira, A. L., & Cabral, F. A. (2011). Extracts from pitanga (*Eugenia uniflora* L.) leaves: Influence of extraction process on antioxidant properties and yield of phenolic compounds. *Journal of Supercritical Fluids*, 55(3), 998–1006. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.09.001>
- Naik, A. S., Suryawanshi, D., Kumar, M., & Waghmare, R. (2021). Ultrasonic treatment: A cohort review on bioactive compounds, allergens and physico-chemical properties of food. *Current Research in Food Science*, 4, 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.003>
- Nirmal, N. P., Khanashyam, A. C., Mundanat, A. S., Shah, K., Babu, K. S., Thorakkattu, P., Al-Asmari, F., & Pandiselvam, R. (2023). Valorization of Fruit Waste for Bioactive Compounds and Their Applications in the Food Industry. *Foods*, 12(3), 556. <https://doi.org/10.3390/foods12030556>
- Noguera, N. H., Noguera, D. C. L. H., Machado, A. P. da F., Reguengo, L. M., & Nascimento, R. de P. do. (2024). Emerging berries from the Brazilian Amazon and Atlantic Forest biomes: new sources of bioactive compounds with potential health benefits. *Food & Function*, 15(11), 5752–5784. <https://doi.org/10.1039/D4FO00182F>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2022). The PRISMA 2020 statement: an

- updated guideline for reporting systematic reviews. *Epidemiologia e Servicos de Saude*, 31(2), 1–20. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742022000200033>
- Paludo, M. C., Colombo, R. C., Filho, J. T., Hermosín-Gutiérrez, I., Ballus, C. A., & Godoy, H. T. (2019). Optimizing the extraction of anthocyanins from the skin and phenolic compounds from the seed of jabuticaba fruits (*Myrciaria jabuticaba* (Vell.) O. Berg) with ternary mixture experimental designs. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 30(7), 1506–1514. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190047>
- Patra, S. K., Bhattacharya, P., & Verma, N. (2006). Bibliometric study of literature on bibliometrics. *DESIDOC Bulletin of Information Technology*, 26(1), 27–32. <https://doi.org/10.14429/dbit.26.1.3672>
- Peixoto Araujo, N. M., Silva, E. K., Arruda, H. S., de Moraes, D., Angela A. Meireles, M., Pereira, G. A., & Pastore, G. M. (2021). Recovering phenolic compounds from *Eugenia calycina* Cambess employing high-intensity ultrasound treatments: A comparison among its leaves, fruit pulp, and seed as promising sources of bioactive compounds. *Separation and Purification Technology*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118920>
- Pereira, M. T. M., Charret, T. S., Pascoal, V. D. B., Machado, R. L. D., Rocha, L. M., & Pascoal, A. C. R. F. (2022). *Myrciaria* genus: bioactive compounds and biological activities. *Chemistry & Biodiversity*, 19(12), e202200864. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202200864>
- Phytochemicals Market*. (2023). <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/phytochemicals-market.asp>
- R Development Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Raphaelli, C. de O., Camargo, T. M., Radünz, M., Pereira, E. dos S., Concenço, F. I. G. da R., Vizzotto, M., Zavareze, E. da R., & Nora, L. (2024). *Eugenia pyriformis* Cambess-Myrtaceae: An Unexplored Brazilian Species with Antimicrobial and Antioxidant Potential. *Current Nutrition & Food Science*, 20(6), 687–702. <https://doi.org/10.2174/0115734013246333230927061119>
- Resende, L. M., Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2023). Polyphenols in jabuticaba (*Plinia spp.*) peel flours: extraction and comparative evaluation of FTIR and HPLC for quantification of individual compounds. *Foods*, 12(7), 1488. <https://doi.org/10.3390/foods12071488>
- Rocha, W. S., Lopes, R. M., da Silva, D. B., Vieira, R. F., da Silva, J. P., & Agostini-Costa, T. S. (2011). Total phenolics and condensed tannins in native fruits from Brazilian savanna. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33(4), 1215–1221. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000400021>
- Rodrigues, L. M., Romanini, E. B., Silva, E., Pilau, E. J., da Costa, S. C., & Madrona, G. S. (2020). Camu-camu bioactive compounds extraction by ecofriendly sequential processes (ultrasound assisted extraction and reverse osmosis). *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105017.

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105017>

- Rodrigues, L. M., Romanini, E. B., Silva, E., Pilau, E. J., da Costa, S. C., & Madrona, G. S. (2021). Uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) residue as a source of antioxidants: An approach to ecofriendly extraction. *Lwt*, 138, 110785. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110785>
- Rodrigues, S., Fernandes, F. A. N., de Brito, E. S., Sousa, A. D., & Narain, N. (2015). Ultrasound extraction of phenolics and anthocyanins from jabuticaba peel. *Industrial Crops and Products*, 69, 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.059>
- Saber, F. R., Munekata, P. E. S., Rizwan, K., El-Nashar, H. A. S., Fahmy, N. M., Aly, S. H., El-Shazly, M., Bouyahya, A., & Lorenzo, J. M. (2023). Family Myrtaceae: The treasure hidden in the complex/diverse composition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2173720>
- Santos, D. T., Veggi, P. C., & Meireles, M. A. A. (2010). Extraction of antioxidant compounds from Jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) skins: Yield, composition and economical evaluation. *Journal of Food Engineering*, 101(1), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.005>
- Santos, D. T., Veggi, P. C., & Meireles, M. A. A. (2012). Optimization and economic evaluation of pressurized liquid extraction of phenolic compounds from jabuticaba skins. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.022>
- Sardi, J. de C. O., Freires, I. A., Lazarini, J. G., Infante, J., de Alencar, S. M., & Rosalen, P. L. (2017). Unexplored endemic fruit species from Brazil: Antibiofilm properties, insights into mode of action, and systemic toxicity of four *Eugenia* spp. *Microbial Pathogenesis*, 105, 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.02.044>
- Schmidt, M. (2008). The Sankey diagram in energy and material flow management. *Journal of Industrial Ecology*, 12(1), 82–94. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00004.x>
- Sezer Okur, P., & Okur, I. (2024). Recent Advances in the Extraction of Phenolic Compounds from Food Wastes by Emerging Technologies. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03365-5>
- Silva, I. de M., Silva, M. R., Augusti, R., Melo, J. O. F., Schmiele, M., & Neves, N. de A. (2023). Obtaining and characterizing polyphenol extracts based on anthocyanins from *Melinis minutiflora* inflorescences and *Plinia cauliflora* fruits and application in gelatins. *Food Research International*, 173, 113426. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113426>
- Soares, S. D., de Souza Lima, A., da Silva, C. T. C., Numa, I. A. N., & Pastore, G. M. (2024). Promising bioactive compounds and biological activities of native Brazilian berries from Myrtaceae and Arecaceae families. *European Food Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04571-3>

- Souza, O. A., Ramalhão, V. G. D. S., Trentin, L. D. M., Funari, C. S., Carneiro, R. L., Bolzani, V. D. S., & Rinaldo, D. (2022). Combining natural deep eutectic solvent and microwave irradiation towards the eco-friendly and optimized extraction of bioactive phenolics from *Eugenia uniflora* L. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 26, 100618. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100618>
- Taver, I. B., Spricigo, P. C., Neto, H. B., de Alencar, S. M., Massarioli, A. P., & Jacomino, A. P. (2022). Bioactive compounds and *in vitro* antioxidant capacity of cambuci and uvaia: An extensive description of little-known fruits from the Myrtaceae family with high consumption potential. *Foods*, 11(17), 2612. <https://doi.org/10.3390/foods11172612>
- Tietbohl, L. A. C., Mello, C. B., Silva, L. R., Dolabella, I. B., Franco, T. C., Enríquez, J. J. S., Santos, M. G., Fernandes, C. P., Machado, F. P., Mexas, R., Azambuja, P., Araújo, H. P., Moura, W., Ratcliffe, N. A., Feder, D., Rocha, L., & Gonzalez, M. S. (2020). Green insecticide against Chagas disease: effects of essential oil from *Myrciaria floribunda* (Myrtaceae) on the development of *Rhodnius prolixus* nymphs. *Journal of Essential Oil Research*, 32(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/10412905.2019.1631894>
- Ueda, K. M., Keiser, G. M., Leal, F. C., Farias, F. O., Igarashi-Mafra, L., & Mafra, M. R. (2024). A new single-step approach based on supramolecular solvents (SUPRAS) to extract bioactive compounds with different polarities from *Eugenia pyriformis* Cambess (uvaia) pulp. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(1), 242–249. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01143-4>
- Ueda, K. M., Ronko, L. Z., Toci, A. T., Igarashi-Mafra, L., Mafra, M. R., & Farias, F. O. (2022). Green Designer Solvents for Boosting the Extraction of Biocompounds from *Eugenia pyriformis* Cambess Leaves. *ACS Food Science and Technology*, 2(3), 532–540. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00424>
- Vieitez, I., Maceiras, L., Jachmanián, I., & Alborés, S. (2018). Antioxidant and antibacterial activity of different extracts from herbs obtained by maceration or supercritical technology. *Journal of Supercritical Fluids*, 133, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.09.025>
- WFO. (2024). *The WFO Plant List*. <http://www.worldfloraonline.org/taxon/wfo-7000000404>
- Zhao, J., Ma, J., Zhang, Q., Tian, J., Wang, Y., & Meng, X. (2020). Cyanidin-3-glucoside attenuates silica-induced pulmonary inflammatory responses by modulating T cell immune responses and STAT1/STAT3 signaling. *Journal of Functional Foods*, 68, 103911. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103911>

Appendices

Appendix A Scientific articles selected for the scientometric study.

Appendix B Ranking of the Journals publishing in the field.