



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS**

VINICIUS SERAFIM COELHO

**POLIFENÓIS DA CASCA DA JABUTICABA (*Plinia spp.*)
MICROENCAPSULADOS POR *SPRAY DRYING* E INCORPORADOS EM
BEBIDA LÁCTEA: ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS, ESTABILIDADE,
BIOACESSIBILIDADE E RESPOSTA GLICÊMICA**

**ALEGRE - ES
JUNHO – 2023**

VINICIUS SERAFIM COELHO

**POLIFENÓIS DA CASCA DA JABUTICABA (*Plinia spp.*)
MICROENCAPSULADOS POR *SPRAY DRYING* E INCORPORADOS EM
BEBIDA LÁCTEA: ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS, ESTABILIDADE,
BIOACESSIBILIDADE E RESPOSTA GLICÊMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientadora: Prof^a. Dra. Pollyanna Ibrahim Silva
Coorientador: Prof. Dr. André Gustavo Vasconcelos Costa

ALEGRE - ES

JUNHO - 2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C672p Coelho, Vinicius Serafim, 1997-
POLIFENÓIS DA CASCA DA JABUTICABA (*Plinia* spp.)
MICROENCAPSULADOS POR SPRAY DRYING E
INCORPORADOS EM BEBIDA LÁCTEA: ASPECTOS
FÍSICO-QUÍMICOS, ESTABILIDADE,
BIOACESSIBILIDADE E RESPOSTA GLICÊMICA / Vinicius
Serafim Coelho. - 2023.
80 f. : il.

Orientadora: Pollyanna Ibrahim Silva.
Coorientador: Andre Gustavo Vasconcelos Costa.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Jabuticaba. 2. Antocianinas. 3. Polifenóis. 4. Antioxidantes. 5. Resposta Glicêmica. 6. Compostos Bioativos.
I. Silva, Pollyanna Ibrahim. II. Costa, Andre Gustavo Vasconcelos. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 664

VINICIUS SERAFIM COELHO

**“POLIFENÓIS DA CASCA DA JABUTICABA (*Plinia spp.*)
MICROENCAPSULADOS POR SPRAY DRYING E INCORPORADOS
EM BEBIDA LÁCTEA: ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS,
ESTABILIDADE, BIOACESSIBILIDADE E RESPOSTA GLICÊMICA”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Aprovada em 01 de junho de 2023.

Profª. Drª. Pollyanna Ibrahim Silva
Universidade Federal do Espírito Santo-UFES
Orientadora

Pós Doutoranda Mariana Grancier
Universidade Federal do Espírito Santo-UFES
Examinadora Interna

Prof. Dr. Sérgio Henrique Saraiva
Universidade Federal do Espírito Santo-UFES
Examinador Interno

Profª. Drª. Michele Correa Bertoldi
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Examinadora Externa

Documento assinado eletronicamente nos moldes do art. 10 da MP 2200/01 e Lei 14063/20
[Hash SHA256] 52c3e9ce7d8570b7292e84b1d3933522718098dd5fc621dc64345ce56d5f8dfa





documentos defesa dissertação Vinicius

Data e Hora de Criação: 01/06/2023 às 12:07:06

Documentos que originaram esse envelope:

- 120ª Ala Defesa da Dissertação - Vinicius Serafim Coelho.docx (Documento Microsoft Word) - 1 página(s)
- Folha de Aprovação Defesa - Vinicius Serafim Coelho.docx (Documento Microsoft Word) - 1 página(s)
- Folha de Rosto Defesa Dissertação - Vinicius Serafim Coelho.docx (Documento Microsoft Word) - 1 página(s)



Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 52c3a9ca7d8570b729ca84b1d39335227180980d5fc6c1db64345ca56d5f8d1a

[SHA512]: 27a90e1e915894e8d0f6ac4cda8286962a155f7b69db0b316a97dcd9154028a028ee3742c9cb86d9d4c4f495339f3ca4082a0180e2f2131ef8b5a062af880c2e

Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope



ASSINADO - Sergio Henriques Saraiva (sergio.saraiva@ufes.br)

Data/Hora: 01/06/2023 - 12:30:44, IP: 179.109.143.147, Geolocalização [-20.755553, -41.531973]
[SHA256]: c6c2289afeea1be510af3641e489c5c9a7691fa4b1c27cbact270b45a3c5c963



ASSINADO - Michele Correa Bertoldi (mibertoldi@yahoo.com.br)

Data/Hora: 01/06/2023 - 12:50:06, IP: 177.185.38.214
[SHA256]: 901b19a7162522bfa6756f18ab32a3b36c5504de2ca027b3adbc843188ee563



ASSINADO - Mariana Grancieri (marianagrancieri@gmail.com)

Data/Hora: 01/06/2023 - 14:53:49, IP: 177.43.186.187, Geolocalização [-20.857260, -41.129627]
[SHA256]: 4519a344da141d7cbf8e0559c0346d112ab1fdd18f2f0fd35a00f47969a9db8



ASSINADO - Pollyanna Ibrahim Silva (pollyanna.silva@ufes.br)

Data/Hora: 01/06/2023 - 15:09:09, IP: 200.137.72.202, Geolocalização [-20.762243, -41.535366]
[SHA256]: 81baaec7382cb6e1f00ffe13c8a34870865d701a59147102dab975886dc27ab

Histórico de eventos registrados neste envelope

- 01/06/2023 15:09:09 - Envelope finalizado por pollyanna.silva@ufes.br, IP 200.137.72.202
- 01/06/2023 15:09:09 - Assinatura realizada por pollyanna.silva@ufes.br, IP 200.137.72.202
- 01/06/2023 14:53:49 - Assinatura realizada por marianagrancieri@gmail.com, IP 177.43.186.187
- 01/06/2023 14:53:46 - Envelope visualizado por marianagrancieri@gmail.com, IP 177.43.186.187
- 01/06/2023 12:50:06 - Assinatura realizada por mibertoldi@yahoo.com.br, IP 177.185.38.214
- 01/06/2023 12:30:44 - Assinatura realizada por sergio.saraiva@ufes.br, IP 179.109.143.147
- 01/06/2023 12:29:25 - Envelope visualizado por sergio.saraiva@ufes.br, IP 179.109.143.147
- 01/06/2023 12:13:32 - Envelope registrado na Blockchain por pollyanna.silva@ufes.br, IP 186.193.18.186
- 01/06/2023 12:13:30 - Envelope encaminhado para assinaturas por pollyanna.silva@ufes.br, IP 186.193.18.186
- 01/06/2023 12:07:14 - Envelope criado por pollyanna.silva@ufes.br, IP 186.193.18.186

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças para chegar até aqui, não foi fácil, mas ele sempre esteve comigo.

A minha mãe Vera, que auxiliou na formação da pessoa que me tornei, que sempre esteve do meu lado em todos os momentos da minha vida, me motivando a estudar, me dando todo o suporte que precisava. Que sempre me acalmou nos dias difíceis, se hoje estou aqui, foi por ela.

Ao meu companheiro Lucas, que esteve comigo durante esses dois anos, participando das minhas conquistas, ouvindo e me aconselhando nos momentos ruins, você foi testemunha que não foi fácil. Obrigado por estar do meu lado!

A minha orientadora, professora Pollyanna Ibrahim Silva, pelos ensinamentos, pela paciência e por toda contribuição nesse trabalho. Muito obrigado por estar sempre acessível e por despertar em mim, o interesse em seguir nessa linha de pesquisa, certamente você teve uma grande influência nos meus planos futuros e sempre será lembrada com muito carinho.

A meu coorientador, professor André Vasconcelos e a colega Mariana Grancieri, que auxiliaram nas etapas de desenvolvimento deste trabalho. E ao professor Sergio Saraiva, que me ajudou muito nas análises estatísticas, sempre disponível e muito prestativo.

As minhas amigas Sandy e Jessica, por estarem sempre presentes na minha vida, me aconselhando nas melhores escolhas.

Os meus parceiros, Jefferson, Debora e Lara, pelo companheirismo e auxílio do dia a dia no laboratório.

Aos técnicos Mauricio, Leticia, Eduardo, Raphael, pelo auxílio e ensinamentos.

Agradeço também a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PCTA) por ter me recebido de braços abertos, me oferecendo toda a estrutura para a elaboração deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Edital Universal, proc. 409221/2018-0), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES e a cooperação do Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (CAPES/FAPES-PDPG,

proc. 2021-5S41N) pelo financiamento do projeto e pela bolsa de estudos.

A todos que de uma forma ou de outra contribuíram com a minha formação, meu muito obrigado!

BIOGRAFIA

Vinicius Serafim Coelho, filho de Vera Lucia Serafim e Wilson Jurastik Coelho, nasceu em Afonso Cláudio, Espírito Santo, em 26 de julho de 1997.

Em março de 2016, iniciou o curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, no Instituto Federal do Espírito Santo, campus Venda Nova do Imigrante, colando grau em junho de 2021. No mesmo mês e ano, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, nível mestrado na Universidade Federal do Espírito Santo campus Alegre.

Em junho de 2023, submeteu-se à defesa da dissertação.

SUMÁRIO

RESUMO	XII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Referências Bibliográficas	3
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo geral.....	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
ARTIGO 1	9
Maltodextrina e goma arábica como agentes encapsulantes dos polifenóis extraídos da casca da jabuticaba (<i>Plinia spp.</i>) na secagem por <i>spray dryer</i>	9
RESUMO	9
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
2.1 Material	11
2.2 Obtenção do extrato concentrado de jabuticaba	11
2.3 Microencapsulação do extrato em secagem por <i>spray dryer</i>	12
2.3.1 Análises físico-químicas dos extratos e dos pós microencapsulados da casca de jabuticaba.....	12
2.3.1.1 Umidade.....	13
2.3.1.2 Higroscopicidade	13
2.3.1.3 Solubilidade	13
2.3.1.4 Análises colorimétricas	13
2.3.1.5 Caracterização morfológica das partículas por microscopia eletrônica de varredura (SEM).....	14
2.3.1.6 Propriedades térmicas dos microencapsulados.....	14
2.3.1.7 Difração de Raios X	15
2.3.2 Quantificação dos compostos bioativos e avaliação da capacidade antioxidante.....	15
2.3.2.1 Conteúdo fenólico total	15
2.3.2.2 Antocianinas totais	16
2.3.2.3 Capacidade antioxidante – ABTS.....	16
2.3.2.4 Capacidade antioxidante – DPPH	17
2.3.2.5 Capacidade antioxidante – FRAP.....	17

2.3.2.6	Eficiência de encapsulamento.....	17
2.3.3	Análise estatística	18
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
3.1	Caracterização do extrato concentrado da casca da jabuticaba.....	18
3.2	Caracterização físico-química dos microencapsulados de casca de jabuticaba.....	21
3.2.1	Colorimetria dos microencapsulados.....	24
3.2.2	Microestrutura dos microencapsulados	25
3.2.3	Análises térmicas.....	27
3.2.4	Cristalinidade	30
3.2.5	Compostos bioativos, capacidade antioxidante e eficiência de encapsulamento.....	32
4.	CONCLUSÃO	35
	AGRADECIMENTOS	35
5.	REFERÊNCIAS.....	35
	ARTIGO 2.....	43
	RESUMO	43
1.	INTRODUÇÃO	44
2.	MATERIAIS E MÉTODOS	46
2.1	Material	46
2.2	Obtenção do extrato concentrado de jabuticaba e dos microencapsulados	46
2.3	Microencapsulação do extrato em secagem por spray dryer	47
2.4	Formulação do sistema modelo de bebida láctea fermentada.....	47
2.5	Estabilidade do sistema modelo de bebida láctea.....	48
2.5.1.	Acidez total titulável e potencial hidrogeniônico	49
2.5.2.	Análises colorimétricas	49
2.5.3	Compostos bioativos e capacidade antioxidante da bebida.....	49
2.5.3.1	Conteúdo de fenólicos totais	50
2.5.3.2	Antocianinas totais	50
2.5.3.3	Capacidade antioxidante – ABTS.....	50
2.5.3.4	Capacidade antioxidante – DPPH	51
2.5.3.5	Capacidade antioxidante – FRAP	51
2.5.3.6	Cinética de degradação.....	51
2.6	Bioacessibilidade in vitro do sistema-modelo de bebida láctea	51

2.7 Resposta glicêmica do sistema-modelo de bebida láctea	52
2.7.1 Tamanho da amostra	52
2.7.2 Critérios de seleção e orientação dos indivíduos	53
2.7.3 Resposta glicêmica das formulações	53
2.8 Análises estatísticas	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
3.1 pH e acidez	55
3.2 Colorimetria	56
3.3 Estabilidade dos compostos bioativos	62
3.4 Bioacessibilidade dos compostos bioativos na bebida	48
3.5 Resposta glicêmica das bebidas lácteas fermentadas	53
4. CONCLUSÃO	54
AGRADECIMENTOS	55
5. REFERÊNCIAS.....	65
CONCLUSÃO GERAL	72
APÊNDICE A – FICHA DE RECRUTAMENTO DOS VOLUNTÁRIOS PARA A RESPOSTA GLICÊMICA.....	73
APÊNDICE B- FICHA INDIVIDUAL DE MONITORAMENTO DA GLICEMIA CAPILAR	74
APÊNDICE C - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)	75
APÊNDICE D- MONITORAMENTO DAS ALTERAÇÕES GLICÊMICAS POR TEMPO	80

RESUMO

COELHO, Vinicius Serafim. **Polifenóis da casca da jabuticaba (*plinia spp.*) microencapsulados por *spray drying* e incorporados em bebida láctea: aspectos físico-químicos, estabilidade, bioacessibilidade e resposta glicêmica. 2023.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES. Orientadora: Prof^a. Dra. Pollyanna Ibrahim Silva. Coorientador: Prof. Dr. André Gustavo Vasconcelos Costa.

A casca da jabuticaba (*Plinia spp.*) apresenta-se considerável fonte de polifenóis, como as antocianinas, entretanto é comumente descartada como biorresíduo, representando cerca de 30% do fruto. Por apresentar uma considerável fonte desses fitoquímicos, de natureza antioxidante, sua utilização na indústria de alimentos pode ser uma alternativa promissora, elevando os aspectos nutricionais dos produtos. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi microencapsular por *spray drying*, extratos obtidos da casca de jabuticaba (EJB), utilizando a maltodextrina (MD) e a goma arábica (GA) como agentes carreadores. Os pós microencapsulados de maltodextrina (PMD) e goma arábica (PGA), foram caracterizados quanto a umidade, solubilidade, higroscopicidade, calorimetria, microestrutura (SEM), propriedades térmicas, cristalinidade, teor de compostos fenólicos e antocianinas, capacidade antioxidante (ABTS, DPPH e FRAP) e eficiência de encapsulamento (EE%). Os pós (PMD e PGA, respectivamente) e o extrato concentrado (EJB), também foram incorporados em sistemas-modelo de bebida láctea, e a estabilidade foi avaliada durante 28 dias de armazenamento, quanto ao pH e acidez, calorimetria, teor de fenólicos e antocianinas e capacidade antioxidante. As bebidas também foram submetidas ao ensaio da bioacessibilidade, por simulação gastrointestinal *in vitro* (SGI) e foi avaliada sua resposta glicêmica pós-prandial em indivíduos saudáveis. Os PMD obtiveram a menor umidade ($4,22 \pm 0,03$). Para PMD e PGA, respectivamente, a higroscopicidade ($18,08 \pm 0,29$ e $19,32 \pm 1,16\%$) e solubilidade ($92,71 \pm 1,20$ e $91,57 \pm 0,69\%$), foram iguais estatisticamente ($p > 0,05$). PMD obteve o maior valor do parâmetro de cor a^* ($54,20 \pm 0,03$), e PGA, os menores valores de ΔE ($2,87 \pm 0,74$), indicando que a cor original dos pigmentos, foi conservada mesmo após a secagem por *spray dryer*. Os PGA apresentaram superfícies parcialmente lisas destacando-se como bom agente carreador, oferecendo maior proteção ao material de núcleo, contra potenciais fontes de degradação. Os polifenóis adquiriram maior resistência térmica ($>200^\circ\text{C}$) e menor perda de massa após a microencapsulação em comparação ao extrato ausente de agentes carreadores. Ambos os pós se caracterizam como estruturas semicristalinas, indicando que os materiais são potencialmente mais resistentes ao armazenamento. Em relação aos aspectos químicos, PGA, obteve o maior conteúdo de fenólicos totais ($232,63 \pm 9,04 \text{ mg AGE} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), porém o conteúdo de antocianinas totais, foram iguais ($p > 0,05$) entre PMD ($53,85 \pm 1,84 \text{ mg cy-3-gli} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) e PGA ($50,20$

$\pm 2,50$ mg cy-3-gli.100 g⁻¹, respectivamente. A maior capacidade antioxidante ABTS ($33,21 \pm 1,68$ $\mu\text{mol Trolox.g}^{-1}$), DPPH ($25,71 \pm 0,25$ $\mu\text{mol Trolox.g}^{-1}$) e FRAP ($86,69 \pm 4,40$ $\mu\text{mol sulfato ferroso/g}^{-1}$) foram obtidas para PGA. A eficiência de encapsulamento para os PMD foi superior quanto ao conteúdo de fenólicos totais ($82,64 \pm 0,34\%$) e para antocianinas totais, PMD ($61,71 \pm 0,81\%$) e PGA ($64,39 \pm 0,79\%$), não houve diferença ($p > 0,05$). A bebida láctea que obteve o menor valor de pH foi, PGA ($3,91 \pm 0,02$), e a maior acidez ($1,33 \pm 0,02$), ambos os parâmetros foram estáveis ao longo do armazenamento para todos os tratamentos. Para a cor, a bebida incorporada com PMD, obteve os maiores valores do parâmetro a*, entretanto todos os tratamentos obtiveram a redução significativa ($p < 0,05$), durante os 28 dias de armazenamento, atribuído principalmente, a degradação das antocianinas, confirmadas pela análise da cinética e tempo de meia vida desses compostos. A bebida incorporada dos PGA, obteve o maior tempo de meia vida das antocianinas (49,86 dias), indicando que a goma arábica promoveu a maior conservação desses pigmentos. O maior conteúdo de fenólicos totais, foram obtidos para as bebidas lácteas incorporadas de PMD ($105,33 \pm 4,51$ mg AGE.100 g⁻¹), assim como a maior atividade antioxidante FRAP ($1661,68 \pm 159,58$ $\mu\text{mol sulfato ferroso/g}^{-1}$). A maior capacidade antioxidante ABTS foi da bebida láctea incorporada com PGA ($533,78 \pm 144$ $\mu\text{mol Trolox.100g}^{-1}$). A atividade antioxidante DPPH entre as bebidas incorporados com PMD e PGA, foram iguais ($p > 0,05$), sendo ($2119,46 \pm 344,09$ e $2144,07 \pm 963,70$ $\mu\text{mol Trolox/100g}^{-1}$), respectivamente. Os fenólicos totais e o potencial antioxidante foi estável para todos os tratamentos ao longo de 28 dias de armazenamento. A SGI promoveu uma maior recuperação dos bioativos, possivelmente devido quebra pelas enzimas proteolíticas, da associação polifenol-proteína, podendo aumentar a biodisponibilidade dos polifenóis. Os maiores valores de polifenóis totais, após a digestão, foram obtidos para as bebidas incorporadas de PMD e EJB ($283,47 \pm 10,05$ e $315,38 \pm 7,61$ mg AGE.100 g⁻¹), respectivamente, consideradas iguais ($p > 0,05$). Assim também, como os valores de antocianinas totais entre os dois tratamentos ($31,72 \pm 1,13$ e $34,38 \pm 0,10$ mg. cy-3-gli.100g⁻¹). As menores áreas sub a curva da glicose incremental (iAUC) foram obtidas para as bebidas incorporadas de PGA e EJB, reforçando a importância dos bioativos na redução da glicemia. Conclui-se que, tanto os microencapsulados quanto o extrato da jabuticaba, são boas alternativas para elevar o consumo de polifenóis na alimentação, com considerável potencial antioxidante, boa estabilidade e diminuindo a resposta glicêmica de produtos alimentícios, podendo agregar na funcionalidade ao produto incorporado.

Palavras-chave: antioxidante, colorimetria, antocianinas, lácteos, resposta glicêmica

ABSTRACT

COELHO, Vinicius Serafim. **Polyphenols from jabuticaba peel (*plinia spp.*) microencapsulated by spray drying and incorporated into dairy beverage: physicochemical aspects, stability, bioaccessibility, and glycemic response. 2023.** Dissertation (Master's in Food Science and Technology) - Federal University of Espírito Santo, Alegre – ES. Advisor: Prof. Dr. Pollyanna Ibrahim Silva. Co-advisor: Prof. Dr. André Gustavo Vasconcelos Costa.

The jabuticaba peel (*Plinia spp.*) is a significant source of polyphenols, such as anthocyanins. However, it is commonly discarded as a byproduct, representing approximately 30% of the fruit. Due to its considerable content of these antioxidant phytochemicals, its utilization in the food industry could be a promising alternative, enhancing the nutritional aspects of products. In this context, the objective of this study was to microencapsulate jabuticaba peel extracts (EJB) using spray drying with maltodextrin (MD) and gum arabic (GA) as carrier agents. The microencapsulated powders, maltodextrin powder (PMD), and gum arabic powder (PGA), were characterized for moisture content, solubility, hygroscopicity, calorimetry, microstructure (SEM), thermal properties, crystallinity, phenolic and anthocyanin content, antioxidant capacity (ABTS, DPPH, and FRAP), and encapsulation efficiency (EE%). The powders (PMD and PGA) and the concentrated extract (EJB) were also incorporated into model dairy beverage systems, and their stability was evaluated during 28 days of storage in terms of pH, acidity, calorimetry, phenolic and anthocyanin content, and antioxidant capacity. The beverages were also subjected to in vitro gastrointestinal simulation (SGI) to assess their bioaccessibility, and their postprandial glycemic response was evaluated in healthy individuals. PMD had the lowest moisture content (4.22 ± 0.03). The hygroscopicity (18.08 ± 0.29 and $19.32 \pm 1.16\%$) and solubility (92.71 ± 1.20 and $91.57 \pm 0.69\%$) of PMD and PGA, respectively, were statistically similar ($p > 0.05$). PMD had the highest a^* color parameter value (54.20 ± 0.03), and PGA had the lowest ΔE values (2.87 ± 0.74), indicating that the original color of the pigments was preserved even after spray

drying. PGA showed partially smooth surfaces, highlighting it as a good carrier agent, providing greater protection to the core material against potential degradation sources. The polyphenols exhibited higher thermal resistance ($>200^{\circ}\text{C}$) and lower mass loss after microencapsulation compared to the extract without carrier agents. Both powders exhibited semicrystalline structures, indicating that the materials are potentially more resistant to storage. Regarding the chemical aspects, PGA had the highest total phenolic content (232.63 ± 9.04 mg GAE.100 g^{-1}), while the total anthocyanin content was statistically similar ($p>0.05$) between PMD (53.85 ± 1.84 mg cy-3-glu.100 g^{-1}) and PGA (50.20 ± 2.50 mg cy-3-glu.100 g^{-1}). The highest ABTS (33.21 ± 1.68 $\mu\text{mol Trolox.g}^{-1}$), DPPH (25.71 ± 0.25 $\mu\text{mol Trolox.g}^{-1}$), and FRAP (86.69 ± 4.40 $\mu\text{mol ferrous sulfate/g}^{-1}$) antioxidant capacities were obtained for PGA. The encapsulation efficiency for PMD was higher in terms of total phenolic content ($82.64 \pm 0.34\%$) and for total anthocyanin content, PMD ($61.71 \pm 0.81\%$) and PGA ($64.39 \pm 0.79\%$), with no significant difference ($p>0.05$). The dairy beverage with PGA had the lowest pH value (3.91 ± 0.02), and the highest acidity (1.33 ± 0.02). Both parameters remained stable throughout the storage period for all treatments. Regarding color, the beverage incorporated with PMD had the highest values of the a^* parameter, but all treatments showed a significant reduction ($p<0.05$) during the 28 days of storage, mainly due to the degradation of anthocyanins, confirmed by the analysis of the kinetics and half-life of these compounds. The beverage incorporated with PGA had the longest half-life for anthocyanins (49.86 days), indicating that gum arabic promoted the greatest preservation of these pigments. The highest total phenolic content was obtained for the dairy beverages incorporated with PMD (105.33 ± 4.51 mg GAE.100 g^{-1}), as well as the highest FRAP antioxidant activity (1661.68 ± 159.58 $\mu\text{mol ferrous sulfate/g}^{-1}$). The dairy beverage incorporated with PGA had the highest ABTS antioxidant capacity (533.78 ± 144 $\mu\text{mol Trolox.100g}^{-1}$). The DPPH antioxidant activity between the beverages incorporated with PMD and PGA was similar ($p>0.05$), being (2119.46 ± 344.09 and 2144.07 ± 963.70 $\mu\text{mol Trolox/100g}^{-1}$), respectively. The total phenolic content and antioxidant potential remained stable for all treatments throughout the 28 days of storage. The in vitro gastrointestinal simulation (SGI) promoted a higher recovery of bioactives, possibly due to the breakage of the polyphenol-protein association by proteolytic enzymes, which may increase the

bioavailability of polyphenols. The highest values of total phenolics after digestion were obtained for the beverages incorporated with PMD and EJB (283.47 ± 10.05 and 315.38 ± 7.61 mg GAE.100 g⁻¹), respectively, considered statistically similar ($p>0.05$). The same applies to the values of total anthocyanins between the two treatments (31.72 ± 1.13 and 34.38 ± 0.10 mg cy-3-glu.100g⁻¹). The lowest incremental glucose area under the curve (iAUC) was obtained for the beverages incorporated with PGA and EJB, reinforcing the importance of bioactives in reducing glycemia. In conclusion, both microencapsulated powders and the jabuticaba extract are good alternatives to increase the consumption of polyphenols in the diet, with considerable antioxidant potential, good stability, and a reduction in the glycemic response of food products, thus adding functionality to the incorporated product.

Key-words: antioxidant, colorimetry, anthocyanins, dairy products, glycemic response

1. INTRODUÇÃO

A jabuticaba, (*Plinia spp.*) é uma fruta nativa brasileira da Mata Atlântica, pertencente à família *Myrtaceae*, e ao gênero *Myrciaria*. É uma fruta originária do Centro Sul, consumida principalmente fresca, embora também seja processada industrialmente para a produção de sucos, geleias, xaropes, licores, bebidas fermentadas, entre outros. Durante a produção do suco de jabuticaba, ou no processamento industrial de modo geral, aproximadamente 50% da fruta é considerada biorresíduo, constituído de bagaço contendo principalmente cascas e sementes (ALEZANDRO; GRANATO; GENOVESE, 2013; GURAK et al., 2014; LACERDA MASSA et al., 2020).

Os principais compostos relatados na composição dos frutos da jabuticaba são carboidratos, principalmente glicose e frutose, fibras, vitaminas e minerais (principalmente, potássio, nitrogênio e magnésio), e quando maduros, são ricos em compostos bioativos, os polifenóis, como as antocianinas, concentrando-se principalmente na casca, além de derivados de proantocianidinas, quercetina, e ácido elágico, como os elagitaninos (ALEZANDRO; GRANATO; GENOVESE, 2013; INADA et al., 2021).

A análise de diferentes partes da fruta mostra que a casca de jabuticaba apresenta a maior quantidade de conteúdo fenólico total com base no peso seco (2252 mg/100 g), seguida do resíduo de despulpção (casca e sementes), (1658 mg/100 g), sementes (986 mg/100 g), fruta inteira (815 mg/100 g) e polpa (20 mg/100 g), sendo 56% de fenólicos solúveis e 44% de fenólicos insolúveis (INADA et al., 2015). As antocianinas, (delfinidina-3-O-glicosídeo e a cianidina-3-O-glicosídeo) presentes na casca do fruto, são pigmentos vegetais, solúveis em água, responsáveis pela cor dos frutos vermelho-arroxeados, e que pertencem à classe dos compostos fenólicos conhecidos como flavonóides. Os compostos apresentam atividades antioxidante, antiinflamatória, antimutagênica, quimioprotetora e antimicrobiana (ALBUQUERQUE et al., 2020; INADA et al., 2021; NEVES et al., 2018; PIMENTA INADA et al., 2020).

O consumo de jabuticaba e seus derivados está associado a benefícios à saúde, com inúmeras atividades biológicas no organismo, como, anti-obesidade, efeitos cardioprotetores, antiproliferativo e efeito contra doenças neurodegenerativas, como Alzheimer e Parkinson (DA SILVA et al., 2017; DA SILVA-MAIA et al., 2019;

NOGUEIRA-LIMA et al., 2020; ROMÃO et al., 2019; TOMÁS-BARBERÁN et al., 2017). As atividades biológicas se devem, em sua maioria, à grande concentração de compostos fenólicos e alta capacidade antioxidante do fruto (NEVES et al., 2018).

As frutas pertencentes à família das *Myrtaceas*, como a jabuticaba (*Plinia spp.*), o araçá (*Psidium guineenses Sw.*), o araçá-boi (*Eugenia stipitata*), a cagaita (*Eugenia dysenterica*), e a goiaba (*Psidium guajava L.*), são excelentes fontes de compostos bioativos de natureza fenólica, os quais estão envolvidos na inibição de enzimas do metabolismo de carboidratos, α -amilase e α -glicosidase, o que retarda o tempo de digestão de carboidratos e possibilita menor elevação da glicemia pós-prandial em indivíduos saudáveis (Balisteiro et al., 2013; De Souza Schmidt Gonçalves et al., 2010; Dragano et al., 2013; Habtemariam, 2019).

O pó de casca de jabuticaba liofilizada foi eficaz para reduzir a resistência à insulina em camundongos (DRAGANO et al., 2013). Em outro estudo, constatou-se que os polifenóis da jabuticaba (*Plinia jaboticaba*) reduziram a hiperglicemia e a resistência à insulina (MOURA et al., 2021). Foram estudados os efeitos da farinha de casca de *Myrciaria cauliflora* em ratos alimentados com uma dieta rica em gordura, e houve redução significativa da glicose sérica em comparação com controle, e este resultado foi devido à composição fibrosa e fenólica do fruto (ARAÚJO et al., 2014). Albuquerque et al. (2020) avaliaram o potencial antioxidante *in vitro* da casca de jabuticaba contra a peroxidação lipídica dos tecidos cerebrais de suínos, observando que o extrato de epicarpo de jabuticaba apresentou elevada atividade antioxidante, superior ao antioxidante referência Trolox. Silva-Maia et al. (2019) estudaram os potenciais efeitos antioxidantes do extrato de jabuticaba (*Plinia jaboticaba*) *in vitro* e *in vivo* utilizando ratos e concluíram que o extrato atuou na modulação da microbiota intestinal.

No que se refere à aplicação industrial, um estudo avaliou o uso tecnológico do pó da casca da jabuticaba como corante na aceitabilidade de iogurtes, agregando na confirmação positiva do consumidor para sabores de frutas como frutas vermelhas, mostrando-se uma alternativa viável para a substituição de corantes artificiais (FREITAS-SÁ et al., 2018). Outros produtos como embutidos cárneos (BALDIN et al., 2016, 2018; DE ALMEIDA et al., 2015), biscoitos, cereais matinais e macarrons (ALBUQUERQUE et al., 2020; MARQUETTI et al., 2018; OLIVEIRA; ALENCAR; STEEL, 2018), bebidas fermentadas (DE SÁ et al., 2014), iogurte (ALBUQUERQUE et al., 2020) também se destacam pela aplicação industrial dos subprodutos da

jabuticaba.

A jabuticaba é uma fruta altamente perecível, com tempo de vida útil curto (3 a 7 dias) e para aumentar o consumo de seus compostos bioativos é necessário aplicar técnicas de preservação, visto que seus compostos bioativos são suscetíveis a reações degradativas durante o processamento e armazenamento, em condições ambientais adversas, incluindo elevadas temperaturas, incidência de luz, alterações de pH e oxigênio (Albuquerque et al., 2020).

A microencapsulação têm se mostrado uma alternativa viável na tecnologia de alimentos, como uma técnica que permite a imobilização, proteção, controle e liberação de compostos bioativos no material de encapsulação, isto é, o aprisionamento de um ingrediente, pequenas partículas sólidas, gotículas líquidas ou gases em um revestimento (material de parede), uma matriz protetora de tamanho micron (1–1000 μm), melhorando assim sua biodisponibilidade e solubilidade em água e aumentando sua estabilidade (DE CÁSSIA SOUSA MENDES et al., 2021; FIDELIS et al., 2021; LOURENÇO; MOLDÃO-MARTINS; ALVES, 2020; NAZZARO et al., 2012; YE et al., 2009). Os materiais de parede mais utilizados nessa técnica são hidrocolóides (goma arábica, alginato, quitosana, pectina), carboidratos (amido modificado, maltodextrina, ciclodextrinas), celulose, proteínas (caseína, proteína de soro de leite, gelatina, proteína de soja) e lipídios (óleos vegetais hidrogenados, fosfolipídios, mono- e triglicerídeos), e sua escolha depende da interação com o composto bioativo a ser encapsulado (LI et al., 2017; VILA; CHAUD; BALCÃO, 2015). Entre as técnicas utilizadas para o processo de microencapsulação, a secagem por *spray dryer* e a liofilização são as técnicas mais comumente usadas pela indústria de alimentos para obter a liberação controlada desses compostos funcionais e na recuperação de subprodutos da agroindústria (MARCILLO-PARRA et al., 2021).

Neste contexto, o objetivo do estudo foi analisar a incorporação de microencapsulados de extrato de casca de jabuticaba com diferentes agentes carreadores, em sistema-modelo de bebida láctea e seus efeitos sobre a estabilidade de compostos bioativos, bioacessibilidade de polifenóis *in vitro* e sua resposta glicêmica em indivíduos saudáveis.

1.1 Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, B. R. et al. Anthocyanin-rich extract of jaboticaba epicarp as a natural colorant: Optimization of heat- and ultrasound-assisted extractions and application in a bakery product. **Food Chemistry**, v. 316, n. February, p. 126364, 2020.

ALEZANDRO, M. R.; GRANATO, D.; GENOVESE, M. I. Jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg), a Brazilian grape-like fruit, improves plasma lipid profile in streptozotocin-mediated oxidative stress in diabetic rats. **Food Research International**, v. 54, n. 1, p. 650–659, 2013.

ARAÚJO, C. R. R. et al. *Myrciaria cauliflora* peel flour had a hypolipidemic effect in rats fed a moderately high-fat diet. **Journal of Medicinal Food**, v. 17, n. 2, p. 262–267, 2014.

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

BALDIN, J. C. et al. Effect of microencapsulated Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract on quality and storage stability of mortadella sausage. **Food Research International**, v. 108, n. March, p. 551–557, 2018.

BALISTEIRO, D. M.; ALEZANDRO, M. R.; GENOVESE, M. I. Characterization and effect of clarified araçá (*Psidium guineenses* Sw.) juice on postprandial glycemia in healthy subjects. **Food Science and Technology**, v. 33, n. SUPPL.1, p. 66–74, 2013.

DA SILVA, J. K. et al. Functional tea from a Brazilian berry: Overview of the bioactives compounds. **LWT - Food Science and Technology**, v. 76, p. 292–298, 2017.

DA SILVA-MAIA, J. K. et al. Aqueous extract of berry (*Plinia jaboticaba*) byproduct modulates gut microbiota and maintains the balance on antioxidant defense system in rats. **Journal of Food Biochemistry**, v. 43, n. 2, p. 1–11, 2019.

DE ALMEIDA, P. L. et al. Effect of jaboticaba peel extract on lipid oxidation, microbial stability and sensory properties of Bologna-type sausages during refrigerated storage. **Meat Science**, v. 110, p. 9–14, 2015.

DE CÁSSIA SOUSA MENDES, D. et al. Microencapsulation of jaboticaba extracts (*Myrciaria cauliflora*): Evaluation of their bioactive and thermal properties in cassava starch biscuits. **Lwt**, v. 137, n. October 2020, 2021.

DE SÁ, L. Z. C. M. et al. Antioxidant potential and vasodilatory activity of fermented beverages of jaboticaba berry (*Myrciaria jaboticaba*). **Journal of Functional Foods**, v. 8, n. 1, p. 169–179, 2014.

DE SOUZA SCHMIDT GONÇALVES, A. E.; LAJOLO, F. M.; GENOVESE, M. I. Chemical composition and antioxidant/antidiabetic potential of brazilian native fruits and commercial frozen pulps. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 8, p. 4666–4674, 2010.

DRAGANO, N. R. V. et al. Freeze-dried jaboticaba peel powder improves insulin sensitivity in high-fat-fed mice. **British Journal of Nutrition**, v. 110, n. 3, p. 447–455, 2013.

FIDELIS, M. et al. Polyphenols of jaboticaba [*Myrciaria jaboticaba* (Vell .) O . Berg] seeds incorporated in a yogurt model exert antioxidant activity and modulate gut microbiota of 1 , 2-dimethylhydrazine-induced colon cancer in rats. **Food Chemistry**, v. 334, n. May 2020, p. 127565, 2021.

FREITAS-SÁ, D. D. G. C. et al. Effect of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell) O. Berg) and jamelão (*Syzygium cumini* (L.) Skeels) peel powders as colorants on color-flavor congruence and acceptability of yogurts. **Lwt**, v. 96, n. February, p.

215–221, 2018.

GURAK, P. D. et al. Jaboticaba pomace powder obtained as a co-product of juice extraction: A comparative study of powder obtained from peel and whole fruit. **Food Research International**, v. 62, p. 786–792, 2014.

HABTEMARIAM, S. **The chemical and pharmacological basis of guava (Psidium guajava L.) as potential therapy for type 2 diabetes and associated diseases**. [s.l: s.n.].

INADA, K. O. P. et al. Screening of the chemical composition and occurring antioxidants in jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) and jussara (*Euterpe edulis*) fruits and their fractions. **Journal of Functional Foods**, v. 17, p. 422–433, 2015.

INADA, K. O. P. et al. Jaboticaba berry: A comprehensive review on its polyphenol composition, health effects, metabolism, and the development of food products. **Food Research International**, v. 147, n. June, 2021.

LACERDA MASSA, N. M. et al. Effects of digested jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) by-product on growth and metabolism of *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* indicate prebiotic properties. **Lwt**, v. 131, n. June, p. 109766, 2020.

LI, D. et al. Health benefits of anthocyanins and molecular mechanisms: Update from recent decade. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 8, p. 1729–1741, 2017.

LOURENÇO, S. C.; MOLDÃO-MARTINS, M.; ALVES, V. D. Microencapsulation of Pineapple Peel Extract by. **Foods**, p. 9, 718, 2020.

MARCILLO-PARRA, V. et al. Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application – A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 116, p. 11–23, 1 out. 2021.

MARQUETTI, C. et al. Jaboticaba skin flour: Analysis and sustainable alternative source to incorporate bioactive compounds and increase the nutritional value of cookies. **Food Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 629–638, 2018.

MOURA, M. H. C. et al. Long-term supplementation with phenolic compounds from jaboticaba (*Plinia jaboticaba* (Vell.) Berg) reduces adiposity and improves glucose, lipid, and energy metabolism. **Food Research International**, v. 143, n. March, 2021.

NAZZARO, F. et al. Microencapsulation in food science and biotechnology. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, n. 2, p. 182–186, 2012.

NEVES, N. DE A. et al. Flavonols and ellagic acid derivatives in peels of different species of jaboticaba (*Plinia* spp.) identified by HPLC-DAD-ESI/MSn. **Food Chemistry**, v. 252, p. 61–71, 30 jun. 2018.

NOGUEIRA-LIMA, E. et al. High-fat diet effects on the prostatic adenocarcinoma model and jaboticaba peel extract intake: protective response in metabolic disorders and liver histopathology. **Nutrition and Cancer**, v. 72, n. 8, p. 1366–1377, 2020.

OLIVEIRA, L. C.; ALENCAR, N. M. M.; STEEL, C. J. Improvement of sensorial and technological characteristics of extruded breakfast cereals enriched with whole grain wheat flour and jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel. **LWT - Food Science and Technology**, v. 90, n. June 2017, p. 207–214, 2018.

PIMENTA INADA, K. O. et al. Effect of high hydrostatic pressure and drying methods on phenolic compounds profile of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) peel and seed. **Food Chemistry**, v. 309, n. July 2019, p. 125794, 2020.

ROMÃO, P. V. M. et al. Cardioprotective effects of *Plinia cauliflora* (Mart.) Kausel in a rabbit model of doxorubicin-induced heart failure. **Journal of**

Ethnopharmacology, v. 242, n. January, p. 112042, 2019.
SILVA-MAIA, J. K. et al. Aqueous Extract of Brazilian Berry (Myrciaria and Modulates Lactobacillus and Bifidobacterium in Rats with Induced-Colitis. **Nutrients**, v. 11, n. 2776, 2019.
TOMÁS-BARBERÁN, F. A. et al. Urolithins, the rescue of “old” metabolites to understand a “new” concept: Metabotypes as a nexus among phenolic metabolism, microbiota dysbiosis, and host health status. **Molecular Nutrition and Food Research**, v. 61, n. 1, p. 1–35, 2017.
VILA, M. M. D. C.; CHAUD, M. V.; BALCÃO, V. M. Microencapsulation of Natural Anti-Oxidant Pigments. **Microencapsulation and Microspheres for Food Applications**, p. 369–389, 2015.
YE, A. et al. Evaluation of processed cheese fortified with fish oil emulsion. **Food Research International**, v. 42, n. 8, p. 1093–1098, 2009.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar a incorporação de microencapsulados de extrato de casca de jabuticaba com diferentes agentes carreadores, em sistema-modelo de bebida láctea e seus efeitos sobre a estabilidade de compostos bioativos, bioacessibilidade de polifenóis *in vitro* e sua resposta glicêmica pós-prandial.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar a extração dos compostos bioativos das cascas de jabuticaba.
- Realizar a secagem de extratos das cascas de jabuticaba por *spray dryer* com os agentes carreadores, maltodextrina e goma arábica;
- Caracterizar os pós produzidos com relação a umidade, higroscopicidade, solubilidade, cor, microestrutura, estabilidade térmica, cristalinidade, conteúdo fenólico total e antocianinas, atividade antioxidante e eficiência de encapsulamento;
- Incorporar os pós na bebida láctea, comparando a estabilidade dos polifenóis (fenólicos e antocianinas) e a atividade antioxidante com a adição do extrato nesse sistema modelo ao longo do armazenamento de 28 dias.
- Avaliar a bioacessibilidade *in vitro* dos compostos fenólicos e antocianinas nas bebidas lácteas formulados com a adição dos pós e dos extratos;
- Avaliar a resposta glicêmica em indivíduos saudáveis, após o consumo da bebida láctea adicionada de extratos e de pós microencapsulados da jabuticaba.

ARTIGO 1

Maltodextrina e goma arábica como agentes encapsulantes dos polifenóis extraídos da casca da jabuticaba (*Plinia spp.*) na secagem por *spray dryer*

RESUMO

Cascas da jabuticaba (*Plinia spp.*), são fontes de polifenóis, entretanto, a fruta é perecível. A microencapsulação oferece maior proteção aos polifenóis, permitindo estabilidade ao armazenamento e utilização em diferentes matrizes alimentares. O objetivo deste trabalho foi microencapsular os polifenóis da casca da jabuticaba por *spray drying*, utilizando a maltodextrina (MD) e goma arábica (GA) como agentes carreadores. Umidade, higroscopicidade, solubilidade, cor, microestrutura, propriedades térmicas, cristalinidade, conteúdo fenólico total (CFT), antocianinas totais (AT), as atividades antioxidantes (ABTS, DPPH e FRAP) e eficiência de encapsulamento (EE) foram avaliadas. Os pós obtidos, da maltodextrina (PMD) e goma arábica (PGA), não diferiram estatisticamente ($p > 0,05$) quanto à higroscopicidade ($18,08 \pm 0,29$ e $19,32 \pm 1,16$), solubilidade ($92,71 \pm 1,20$ e $91,57 \pm 0,69$) e antocianinas ($53,85 \pm 1,84$ e $50,20 \pm 2,50$ mg cy-3-gli.100 g⁻¹), respectivamente. Diferenças ($p < 0,05$) entre os microencapsulados, foram obtidas para a menor umidade de PMD ($4,22 \pm 0,03$) e seu maior valor do parâmetro a^* ($54,20 \pm 0,03$). Os PGA apresentaram mais CFT ($232,63 \pm 9,04$ mg AGE.100 g⁻¹) e maiores atividades antioxidantes pelo ABTS ($33,21 \pm 1,68$ μ mol Trolox.g⁻¹), DPPH ($25,71 \pm 0,25$ μ mol Trolox.g⁻¹) e FRAP ($86,69 \pm 4,40$ μ mol sulfato ferroso/g⁻¹), e melhor microestrutura. A EE para os CFT, foi maior para PMD ($82,64 \pm 0,34\%$) e não se alterou para AT ($p > 0,05$). Na estabilidade térmica e cristalinidade observou-se que os materiais de parede foram bons agentes encapsulantes, potencialmente estáveis ao armazenamento. A GA e MD aumentam a termoestabilidade e retenção dos bioativos e antioxidantes de interesse da jabuticaba, com potencial utilização em alimentos.

Palavras-chave: microencapsulação, polifenóis, maltodextrina, goma arábica, jabuticaba

1. INTRODUÇÃO

A jabuticaba (*Plinia spp.*) é uma espécie nativa do Brasil, comumente encontrada no bioma da Mata Atlântica. O fruto exótico, é muito apreciado pelo consumo *in natura*, principalmente pelas características sensoriais da polpa, como sabor doce e levemente ácido (Neves et al., 2018). Além da polpa, a fruta da jabuticabeira apresenta sementes e cascas, que representam quase 50% do fruto inteiro, e que normalmente não são consumidos. A coloração da casca da jabuticaba, varia do roxo escuro ao preto, de acordo com o grau de maturação, sendo considerada a parte do fruto com maior concentração de compostos de natureza fenólica, como antocianinas (delfinidina-3-O-glicosídeo e a cianidina-3-O-glicosídeo), quercetina e ácido elágico (Albuquerque, Pereira, et al., 2020a; Inada et al., 2021; Lacerda Massa et al., 2020a)

A casca da jabuticaba apresenta grande potencial como fonte de compostos bioativos, que estão associados à efeitos benéficos na saúde, como atividades antioxidante, antiinflamatória, antimutagênica, quimioprotetora, cardioprotetora, antiproliferativa, efeito contra doenças neurodegenerativas e na diminuição da atividade das enzimas do metabolismo de carboidratos (Albuquerque, Pinela, et al., 2020; Baldin et al., 2018; Hanhineva et al., 2010; Oliveira et al., 2015; Plaza et al., 2016; Zhao et al., 2019). Porém, os fitoquímicos presentes na casca desse fruto estão sujeitos a fatores degradativos, principalmente durante o processamento e armazenamento, como elevadas temperaturas, incidência de luz, alterações de pH e oxigênio, necessitando de tecnologias que aumentem sua estabilidade (Albuquerque, Pereira, et al., 2020a)

A tecnologia de microencapsulação baseia-se no aprisionamento de um ingrediente ativo, geralmente pequenas partículas sólidas, gotículas líquidas ou gases em um revestimento (material de parede), geralmente hidrocoloides, carboidratos, celulose e proteínas. Dentre as técnicas empregadas, a secagem em *spray dryer* ou pulverização, é uma das mais utilizadas, permitindo a imobilização, controle e principalmente maior proteção dos compostos bioativos encapsulados, facilitando a incorporação dos bioativos em diversos alimentos (de Cássia Sousa Mendes et al., 2021; Fidelis et al., 2021a; Gómez-Mascaraque et al., 2017; Li et al., 2017; Lourenço et al., 2020). Dentre esses revestimentos, a maltodextrina é amplamente utilizada na microencapsulação de bioativos devido à sua alta solubilidade, baixa viscosidade em

alta concentração de sólidos, baixo custo relativo, sabor e aroma neutros e boa estabilidade térmica (Loi et al., 2020; Xiao et al., 2022). A goma arábica é reconhecida pela sua alta eficiência de encapsulamento, boa capacidade de formação de filme, estabilidade em temperaturas elevadas, apresenta características emulsificantes, alta solubilidade e baixa viscosidade (Gulão et al., 2014; Hu et al., 2018).

Neste sentido, o objetivo deste estudo foi microencapsular os polifenóis extraídos da casca do fruto da jabuticaba (*Plinia spp.*), utilizando a técnica de secagem por *spray dryer*, avaliando a utilização de diferentes agentes carreadores, quanto às características físico-químicas e antioxidantes dos pós obtidos e seu potencial uso na incorporação em alimentos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Os frutos da jabuticaba (*Plinia spp.*) produzidas na zona rural do município de Sabará - MG, Brasil (19° 53' 21" Sul, Longitude: 43° 48' 17" Oeste), foram adquiridos em novembro de 2021. O fruto inteiro foi recebido *in natura*, higienizado e a obtenção das cascas foi feita por despulpamento manual. As cascas foram armazenadas, sob proteção da luz, a -18 ± 2 °C, até a obtenção dos extratos e a realização das análises.

Os reagentes, 2,2'-azinobis-(3etilbenzotiazolin-6sulphonic) acid (ABTS), 2,4,6-tripiridil-s-triazina (TPTZ), 2,2-difenil-1-picril-hidrazil (DPPH), ácido 6-hidroxi-2,5,7,8 tetrametilcroman-2-carboxílico (Trolox) da Sigma Aldrich (Alemanha), o ácido gálico, carbonato de sódio, cloreto de sódio, álcool etílico e reagente para fenol Folin-Ciocalteu foram adquiridos de Dinâmica Química Contemporânea (Brasil). Cloreto férrico, cloreto de alumínio, nitrito de sódio, hidróxido de sódio, persulfato de potássio e sulfato ferroso foram adquiridos da Neon (Brasil). Todos os reagentes foram de grau analítico ou HPLC. Os agentes carreadores utilizados foram goma arábica (Labsynth, Brasil) e a maltodextrina 10 DE (Absolut Indústria, Brasil).

2.2 Obtenção do extrato concentrado de jabuticaba

O extrato rico em compostos bioativos (EJB), foi obtido a partir da metodologia proposta por Lima et al. (2019), com modificações. As cascas da jabuticaba foram previamente trituradas com o auxílio de mixer (Britânia, Ultra Mixer), e foram adicionadas ao solvente extrator etanol 80% (v/v), acidificado com solução de ácido cítrico saturado, até pH 2,5, na proporção de resíduo:solvente de 1:10 (m/v). Logo

após, o extrato foi levado ao ultrassom de banho (Ultrasonic Power IGBT, CTA do Brasil), a potência de 900W e temperatura de 35°C/30min. Em seguida, o extrato foi filtrado a vácuo em papel Whatman 1 e concentrado, utilizando um evaporador rotatório a vácuo (Fisatom 801, São Paulo, Brasil), para a remoção de todo o etanol residual. O teor de sólidos solúveis (SST), expresso em °Brix, foi medido durante a evaporação rotativa, até sua estabilização, para verificar a finalização do processo. Após, o extrato concentrado foi acondicionado em frasco âmbar e armazenado em freezer (-18 ± 2 °C) para posterior realização das análises. Para a realização das análises da calorimetria diferencial exploratória (DSC), termogravimetria (TGA) e difração de raio-x (DRX), os extratos obtidos foram previamente congelados a -80 °C por 48 horas, e liofilizados em liofilizador de bandejas (JJ CIENTÍFICA JJ-02, LJW, Brasil) a vácuo de 39,99 Pa e temperatura: -25°C). Após, o extrato liofilizado foi triturado com auxílio de macerador, até a obtenção de um pó fino e homogêneo, e armazenado sob refrigeração (-18 ± 2°C) em embalagens de polietileno revestidas com camada laminada.

2.3 Microencapsulação do extrato em secagem por spray dryer

A maltodextrina 10 DE e a goma arábica foram utilizadas como os agentes carreadores da microencapsulação, com concentração final da solução a 30% (m/v). O extrato concentrado do resíduo de jabuticaba obtido (EJB) no item 2.2, foi adicionado ao agente carreador com proporção de 1:3, ou seja, uma parte de extrato, para três partes de agente encapsulante. Para homogeneização das misturas de extratos e agentes encapsulantes, foi utilizado agitador (KASVI, K40-1810H, Brasil), a 30 °C. Os valores de pH e °Brix das soluções adicionadas de extrato concentrado foram medidos antes da secagem. A secagem foi realizada em *spray dryer* (YAMATO, Modelo ADL 3115, China) (Ibrahim Silva et al., 2013). A temperatura de entrada foi de 180 °C e a de saída variando entre 70 ± 5°C, pressão manométrica máxima do ar comprimido de 0,1 MPa, vazão de alimentação de 3,7 mL/min e fluxo do ar de secagem igual a 0,21 m³/min. Após a secagem, os pós microencapsulados com goma arábica (PGA) e maltodextrina (PMD) foram armazenados sob refrigeração (-18 ± 2°C) em embalagens de polietileno revestidas com camada laminada.

2.3.1 Análises físico-químicas dos extratos e dos pós microencapsulados da

casca de jabuticaba

As análises dos extratos e dos pós microencapsulados foram realizadas em três repetições e os dados expressos em média \pm desvio-padrão.

2.3.1.1 Umidade

A umidade foi determinada pelo método gravimétrico com secagem em estufa (SPLabor, SP-102/81) a 105 °C até peso constante, tanto no extrato antes de ser atomizado quanto nos pós produzidos, expressa em porcentagem (AOAC,1995).

2.3.1.2 Higroscopicidade

A higroscopicidade foi determinada de acordo com Cai & Corke (2000). As amostras dos pós foram acondicionadas em temperatura ambiente em dessecadores contendo soluções saturadas de cloreto de sódio (NaCl) (75% de umidade relativa, $A_w = 0,75$). Após uma semana, foi realizada a pesagem das amostras e a higroscopicidade expressa como gramas de umidade absorvida por 100 g de sólidos secos.

2.3.1.3 Solubilidade

Em um béquer de 50 mL contendo água destilada foi adicionado 1 g dos microencapsulados (PMD e PGA), sob agitação em um agitador magnético (KASVI, K40-1810H, Brasil), a 100 rpm por 30 min. Após a solubilização, a solução foi centrifugada a 847 g durante 5 minutos. Em seguida, uma alíquota de 25 mL do sobrenadante foi transferida para uma placa de Petri e seca em estufa a 105 °C até atingir peso constante. O cálculo da solubilidade baseou-se na massa inicial da amostra que foi solubilizada na alíquota de 25 mL do sobrenadante (Bernardes et al., 2019). O resultado foi expresso em porcentagem (Equação 1).

$$\text{Solubilidade (\%)} = \frac{2P_a}{P_b} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

P_a (g) é a massa da alíquota de 25 mL do sobrenadante após a secagem em estufa;

P_b (g) é a massa da amostra em pó inicial seca, incorporada em 50 mL de água.

2.3.1.4 Análises colorimétricas

Foram realizadas leituras diretas no modo reflectância das coordenadas "L*" - luminosidade (0 = preto e 100 = branco), "a*" - intensidade de vermelho (+) e verde (-

), e “b*” - intensidade de amarelo (+) e azul (-), utilizando colorímetro (Konica Minolta, CR-5, Japão), no sistema CIELAB com iluminante D₆₅ e ângulo de observação de 10°, com o objetivo de verificar a perda de cor dos pós atomizados, quando comparado com as soluções antes da secagem em *spray dryer*. Para tal, os pós foram reconstituídos em água destilada até o teor de sólidos solúveis da solução original antes da secagem. A análise dos parâmetros colorimétricos foi realizada no extrato concentrado proveniente das cascas de jabuticaba (EJB), no extrato adicionado dos carreadores, antes de ser submetido ao *spray drying* (EMD e EGA) e nos pós reconstituídos (PGA e PMD) (Silva et al., 2013).

O ângulo de tonalidade cromática (h) e saturação de cor ou chroma (C*) foram calculados pelas Equações (2) e (3). A diferença global de cor (ΔE), foi calculada para verificar das perdas de coloração, segundo a Equação 4:

$$h^\circ = \tan^{-1} (b^*/a^*) \quad (\text{Eq.2})$$

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Eq.4})$$

Em que: ΔE é a diferença global de cor; ΔL é a variação da coordenada L*; Δa é a variação da coordenada a*; Δb é a variação da coordenada b*.

2.3.1.5 Caracterização morfológica das partículas por microscopia eletrônica de varredura (SEM)

O tamanho e a morfologia dos microencapsulados foram avaliados pela microscopia eletrônica de varredura (JEOL, JSM-IT200), de acordo com a metodologia de Silva et al. (2013), com adaptações. Quantidades pequenas de amostras foram colocadas na superfície de fitas dupla-face, fixada em “stubs”. Posteriormente, as amostras foram então revestidas com uma fina camada de ouro sob vácuo, sendo observadas sistematicamente com ampliação de 1000 x, 3000 x, 5000 x, 7000 x e 10000 x.

2.3.1.6 Propriedades térmicas dos microencapsulados

Para investigar as propriedades térmicas (DSC) e termogravimétricas (TGA)

dos pós microencapsulados (PMD e PGA), do extrato concentrado de jabuticaba liofilizado, rico em polifenóis (EJB) e dos carreadores individualmente (MD e GA). Ambas as análises foram realizadas no equipamento Setaram Thermo analyzer (modelo Labsys Evo S60) calibrado com índio. A faixa estudada foi de 30 a 300 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ e um fluxo de nitrogênio de 50 mL min⁻¹ (Khalifa et al., 2019; Rutz et al., 2013).

2.3.1.7 Difração de Raios X

A cristalinidade de microencapsulados (PMD e PGA), do extrato de jabuticaba liofilizado (EJB) e dos materiais de parede individuais (MD e GA), foi estudada empregando a técnica de difração de raios X (Difratômetro de raios X Rigaku Miniflex, Japan) de acordo com o método de Cano-Chauca et al. (2005) e Nthimole et al. (2022), com modificações. A leitura de difração foi capturada em faixa angular de 5–100 (2θ) em um tamanho de passo de 0,0175 graus usando radiação de Cu com um comprimento de onda de 0,154 nm a uma taxa de varredura de 2° min⁻¹. O gerador foi ajustado para uma corrente de 15 Ma e uma tensão de 40 kv.

2.3.2 Quantificação dos compostos bioativos e avaliação da capacidade antioxidante

Previamente à quantificação dos compostos bioativos e à avaliação do potencial antioxidante, os pós microencapsulados foram reconstituídos com água destilada a pH 2,5 com ácido cítrico, diluídos, e as amostras foram então centrifugadas a 13520 g por 5 minutos a temperatura de 20 °C, antes do início das análises, conforme (Lima et al., 2019).

2.3.2.1 Conteúdo fenólico total

O conteúdo fenólico total (CFT) foi determinado pelo ensaio do reagente Folin-Ciocalteu, com base em metodologia adaptada de Singleton, Rossi e Jr (1965). Inicialmente, foi adicionada uma alíquota de 0,6 mL de cada extrato em 3,0 mL de reagente Folin Ciocalteu previamente diluído em água destilada (1:10; v/v). Após 3 minutos de repouso ao abrigo da luz, foram adicionados 2,4 mL de solução saturada de Na₂CO₃. A absorbância foi determinada a 760 nm por espectrofotometria, utilizando o equipamento (Thermo Fisher Scientific, Evolution 300 UV-Vis, Estados Unidos), após 1 hora de repouso em ausência de luz. O CFT foi determinado

utilizando curva padrão de ácido gálico (0-150 mg/L) e os resultados expressos em ácido gálico equivalente (mg AGE / 100g), em base seca.

2.3.2.2 Antocianinas totais

O teor de antocianinas monoméricas totais (AMT) foi determinado utilizando a metodologia do pH diferencial (Giusti & Wrolstad, 2003), com modificações. Alíquotas das amostras foram adicionadas a balões de 10 mL, em seguida completou-se o volume separadamente com dois sistemas tampão: cloreto de potássio – ácido clorídrico pH 1,0 (0,025 M) e acetato de sódio pH 4,5 (0,4 M). O teor das antocianinas foi calculado após a medida espectrofotométrica da absorbância a 510 nm utilizando o equipamento (Thermo Fisher Scientific, Evolution 300 UV-Vis, Estados Unidos). AMT foi calculado de acordo com as Equações (6) e (7), e expresso em mg de cianidina-3-glicosídeo.100 g⁻¹ de amostra, em base seca.

$$A=(ABS_{520\text{ nm}} - ABS_{700\text{ nm}})_{\text{pH } 1.0} - (ABS_{520\text{ nm}} - ABS_{720\text{ nm}})_{\text{pH } 4.5} \quad (\text{Eq.6})$$

$$\text{AMT (mg/L)} = (A \times \text{PM} \times \text{FD}) \times 100 / (\epsilon \times \lambda) \quad (\text{Eq.7})$$

Onde: PM = 449,2 g/mol (massa molar de cianidina-3-glicosídeo); FD = fator de diluição utilizado; ϵ = 26.900 (coeficiente de absorvidade molar da cianidina-3-glicosídeo); λ = 1 cm (caminho óptico da cubeta).

2.3.2.3 Capacidade antioxidante – ABTS

O método de ensaio do radical ABTS (ácido 2,2'-azinobis- (3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)) para a quantificação do potencial antioxidante do EJB, PMD e PGA, foi conduzido de acordo com Re et al. (1999). Foram adicionados 3,5 mL da solução radical ABTS•+, (absorbância corrigida para 0,700 (\pm 0,05) com adição de etanol 80%), com 0,5 mL da amostra, ao abrigo da luz. A realização da leitura foi feita a 734 nm após 6 minutos de reação em espectrofotômetro (Thermo Fisher Scientific, Evolution 300 UV-Vis, Estados Unidos). O Trolox foi utilizado como padrão (0-150 μ mol/L) e os resultados expressos em equivalente de Trolox (μ mol Trolox.g⁻¹), em base seca.

2.3.2.4 Capacidade antioxidante – DPPH

O ensaio DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) seguiu o método proposto por Brand-Williams et al. (1995) com adaptações. Adicionou-se 3,5 mL da solução de DPPH (absorbância corrigida para 0,700 (\pm 0,05) com adição de etanol 80%) em 0,5 mL da amostra. As amostras foram abrigadas da luz e as medidas de absorbância realizadas em espectrofotômetro a 515 nm. O Trolox foi utilizado como padrão (0-150 μ mol/L) e os resultados foram expressos em equivalente de Trolox (μ mol Trolox.g⁻¹), em base seca.

2.3.2.5 Capacidade antioxidante – FRAP

A capacidade antioxidante avaliada pelo potencial de redução do ferro, seguiu a metodologia proposta de Morais et al. (2013). Foram adicionados 0,90 mL das amostras, 0,27 mL de água destilada e 2,70 mL de reagente FRAP previamente preparado, em tubo de ensaio. Após 30 min de incubação a 37 °C, os valores de absorbância foram determinados por espectrofotometria a 595 nm. A capacidade antioxidante das amostras foi determinada com base em curva de calibração, traçada usando FeSO₄.7H₂O (0-2000 μ mol/L). Os resultados foram expressos em μ mol de sulfato ferroso equivalente. g⁻¹, em base seca.

2.3.2.6 Eficiência de encapsulamento

A análise da eficiência do encapsulamento (EE%) dos compostos fenólicos e antocianinas totais baseou-se em Bernardes et al. (2019) e Robert et al. (2010). As microcápsulas foram reconstituídas em água acidificada, com ácido cítrico a pH 2,5, e diluídas na proporção de 2:10 (m/v) para realizar a quantificação das antocianinas totais, e 1:15 para quantificar o conteúdo fenólico total. A quantificação de compostos fenólicos e antocianinas totais no extrato e microcápsulas foi realizada de acordo com o descrito nos itens 2.3.2.1 e 2.3.2.2, respectivamente. Os compostos de superfície CS (antocianinas e/ou fenólicos totais) e a eficiência de encapsulamento (EE%) foram calculados conforme descrito por Robert et al., (2010) de acordo com as Equações (5) e (6):

$$CS (\%) = \frac{CCS}{CCE} * 100 \quad (\text{Eq.5})$$

$$EE (\%) = 100 - CS (\%) \quad (\text{Eq.6})$$

Onde: CS (%): Porcentagem de compostos da superfície dos microencapsulados; CCS: conteúdo de compostos (fenólicos ou antocianinas) da superfície dos microencapsulados; CCE: conteúdo de compostos (fenólicos totais ou antocianinas) do extrato concentrado; EE (%): eficiência da microencapsulação.

2.3.3 Análise estatística

O experimento seguiu o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com dois tratamentos, os agentes carreadores (MD e GA). Os valores foram expressos como média e desvio padrão, e a análise de variância (ANOVA) a 5% de significância foi utilizada para comparar as médias dos dois tratamentos, utilizando o software Statistica 7 (StatSoft, EUA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do extrato concentrado da casca da jabuticaba

Os teores de umidade, pH, sólidos solúveis totais, compostos bioativos (fenólicos totais e antocianinas), parâmetros colorimétricos e capacidade antioxidante do extrato concentrado da casca da jabuticaba estão descritos na Tabela 1. De modo geral, fatores como a proporção de casca/solvente, o solvente utilizado, o tempo e método de extração, podem influenciar nos resultados obtidos, dificultando uma comparação mais próxima das características do extrato obtido, com outros estudos relacionados.

De forma geral, a acidificação do extrato utilizando ácido cítrico até pH 2,5 contribui para uma melhor conservação dos compostos bioativos, principalmente para a coloração e estabilidade das antocianinas extraídas da casca do fruto. No pH 3, ou abaixo, a cor das antocianinas varia do laranja ao vermelho-azulado, sendo predominante o cátion *flavílium* (Giusti & Wrolstad, 2003) . Em pH 1 predomina-se o cátion *flavílium*, enquanto em valores de pH entre 2 e 4 as espécies quinoidais. Já no pH entre 5 e 6, predominam-se pseudobase carbinol e chalcona, respectivamente, em valores de pH superiores a 7, as antocianinas são degradadas dependendo de seus grupos substituintes (Castañeda-Ovando et al., 2009).

Quanto aos compostos bioativos, sabe-se que sua concentração no fruto é influenciada por fatores como o grau de maturação, espécie, além das condições ambientais (Resende et al., 2020, 2023). A presença desses compostos está associada aos principais fatores de interesse na utilização e aproveitamento do resíduo do fruto, como para a elaboração de produtos funcionais, com potencial efeito benéfico para a saúde, principalmente pelo aumento da capacidade antioxidante associado a presença dos bioativos (Baldin et al., 2018; Fidelis et al., 2021). Cabral et al. (2018) encontraram para o extrato de jabuticaba, cerca de 1147,36 mg.100 g⁻¹ (b.s) de polifenóis totais na casca do fruto. Já Borges et al. (2022) encontraram 3898,39 mg/100 g⁻¹ (b.s). no extrato de jabuticaba extraído da casca. Já em relação ao teor de antocianinas, Alezandro; Granato; Genovese, (2013), encontraram na casca da jabuticaba sabará, no fruto totalmente maduro, 147 mg.100 g⁻¹ (b.s). Já Gadioli Tarone et al. (2021), obtiveram teores de 7,8 –10,2 mg. g⁻¹ (b.s) nas cascas de jabuticaba. No extrato da casca da jabuticaba já foram quantificados 50,1 mg. g⁻¹ de antocianinas (b.s) (Albuquerque, Pereira, et al., 2020b). Os resultados do teor de compostos fenólicos totais e antocianinas encontrados no extrato da casca da jabuticaba corroboram com os valores encontrados na literatura, mostrando que a casca do fruto é uma potencial fonte de compostos bioativos de natureza fenólica. No presente estudo, o teor de compostos fenólicos e antocianinas apresentados na Tabela 1, correspondem ao extrato concentrado obtido a partir de 25 g de casca de jabuticaba aproximadamente.

Tabela 1. Caracterização físico-química e capacidade antioxidante do extrato concentrado de jabuticaba.

PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	VALORES MÉDIOS
Umidade %	72,37 ± 0,04
pH	1,50 ± 0,10
Sólidos solúveis totais (°Brix)	27,62 ± 0,04
Fenólicos Totais (mg AGE.100 g ⁻¹)	995,13 ± 1,39
Antocianinas Totais (mg de cy-3-gli.100 g ⁻¹)	140,84 ± 7,85
ABTS (µmol Trolox. g ⁻¹)	75,61 ± 9,61
DPPH (µmol Trolox. g ⁻¹)	138,12 ± 5,52
FRAP (µmol sulfato ferroso. g ⁻¹)	246,83 ± 3,13
Colorimetria	
L*	8,98 ± 1,29
a*	35,37 ± 1,92
b*	14,71 ± 2,33
C*	38,32 ± 2,65
h°	22,48 ± 2,19

*Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3) para o extrato concentrado de jabuticaba. Valores de fenólicos totais e antocianinas totais expressos em base seca.

Em relação à capacidade antioxidante dos extratos concentrados, isto é, seu potencial de sequestro de radicais livres, foram avaliadas por diferentes ensaios, como ABTS e DPPH, comumente utilizado para o estudo de diferentes extratos de plantas (Scioli et al., 2022). O ensaio de poder redutor FRAP, baseado na habilidade de doação de elétrons dos extratos, também foi avaliado. Os valores da capacidade antioxidante dos extratos também estão descritos na Tabela 1. De modo geral, em ambos os ensaios, foram obtidas considerável capacidades antioxidantes, demonstrando que o extrato da jabuticaba apresenta grande potencial como antioxidante natural.

A presença de compostos bioativos, como os polifenóis, (antocianinas, flavonoides, taninos e derivados do ácido elágico) presentes na casca do fruto da jabuticaba, são responsáveis pelo potencial antioxidante do extrato (Baldin et al.,

2016) . O potencial antioxidante e anti-inflamatório desses compostos pode ajudar na prevenção do risco de doenças cardiovasculares, neurodegenerativas e crônicas (Plaza et al., 2016; Zhao et al., 2019).

Os parâmetros de cor são importantes para a característica do extrato obtido, estando relacionados à eficiência da extração dos pigmentos, como as antocianinas, e conseqüentemente ao seu potencial uso como corante natural em alimentos. Ao analisar o parâmetro L* (luminosidade), o extrato concentrado apresentou um aspecto mais escuro, e como este parâmetro está relacionado à transmissão de luz, valores de L* mais baixos seriam desejáveis, pois estariam relacionados a um maior rendimento e eficiência de extração desses compostos (Montes et al., 2005). A mesma associação pode ser usada para explicar parâmetro C*, sendo que, quanto maior o valor deste parâmetro, mais desejável, pois este é a expressão quantitativa da cromaticidade dos extratos, relacionando-se com a sensação visual de “quantidade de cor”. Montes et al., (2005) encontrou valores de C* de 22,8 a 54,3 para extratos de jabuticaba. Já para Silva et al. (2013b), este parâmetro variou de 10,96 a 26,53. Para o parâmetro a* (intensidade do vermelho), os valores indicaram uma boa extração das antocianinas, favorecida pelo pH baixo do meio, onde a forma predominante do pigmento é o cátion *flavilium*, de coloração vermelha. O parâmetro h° indica o ângulo de tonalidade cromática, para este parâmetro, quanto mais próximo de 0°, mais os extratos se aproximam da coloração vermelha. Para Montes et al. (2005), o ângulo de tonalidade cromática do extrato de jabuticaba com etanol acidificado variou de 16,11 a 22,70.

3.2 Caracterização físico-química dos microencapsulados de casca de jabuticaba

As características físicas dos pós microencapsulados produzidos com maltodextrina e goma arábica, como umidade, higroscopicidade e solubilidade, estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Características físicas dos pós microencapsulados

Característica	Pós microencapsulados	
	Maltodextrina	Goma Arábica
Umidade (%)	4,22 ± 0,03 ^a	7,21 ± 0,064 ^b
Higroscopicidade (g de H ₂ O.100 g ⁻¹)	18,08 ± 0,29 ^a	19,32 ± 1,16 ^a
Solubilidade (%)	92,71 ± 1,20 ^a	91,57 ± 0,69 ^a

*Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3) para as duas formulações de pós microencapsulados. Maltodextrina (PMD) e goma arábica (PGA), em base seca. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística pelo teste t (p < 0,05).

Os pós produzidos estão apresentados na Fig. 1. Quanto à umidade, os pós produzidos com o agente carregador goma arábica apresentaram maior teor quando comparado a microencapsulação com maltodextrina (p<0,05). A diferença no teor de umidade entre os agentes carreadores está relacionada as suas distintas estruturas químicas, e as interações de cada um, com a umidade ambiental (Silva et al., 2013).

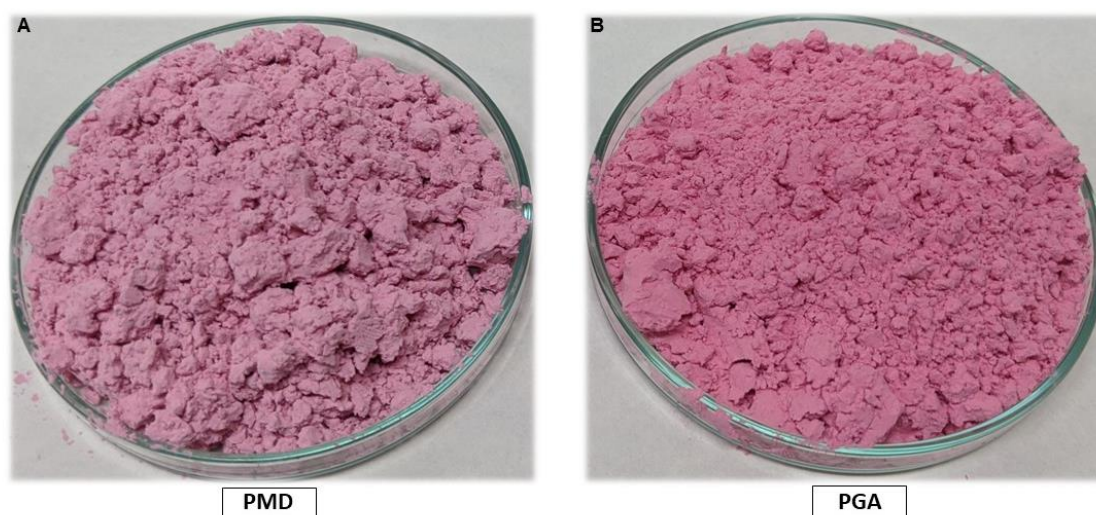


Fig.1: Pós microencapsulados com maltodextrina (PMD) (A) e goma arábica (PGA) (B).

A umidade é uma importante propriedade dos microencapsulados, pois correlaciona-se a eficiência de secagem, fluidez do pó, viscosidade e principalmente à sua estabilidade durante o armazenamento, ligado a cristalização e o aumento ou diminuição da temperatura de transição vítrea (de Cássia Gomes da Rocha et al., 2023). Em geral, a umidade de pós microencapsulados pode variar com base no tipo de secagem e na temperatura, na proporção entre material de núcleo e agente carreador, além da combinação de diferentes materiais de parede (Kha et al., 2010;

Tolun et al., 2016a). No estudo sobre a microencapsulação do extrato de uva por *spray drying* utilizando maltodextrina e goma arábica como agentes carreadores combinados, o teor de umidade foi determinado entre 5,1 e 10,7% (Tolun et al., 2016a). Já na microencapsulação do extrato de cenoura preta, utilizando maltodextrina com diferentes DE, os pesquisadores encontraram a umidade na faixa de 5,5 a 6,03% (Ersus & Yurdagel, 2007).

Na avaliação da higroscopicidade dos microencapsulados, PMD e PGA, apresentadas na Tabela 2, não foram observadas diferenças significativas ($p>0,05$). Os pós menos higroscópicos, em termos de conservação, são mais desejáveis, já que a umidade absorvida do ambiente pelos pós, pode causar a degradação das partículas pelo amolecimento, expondo o material de núcleo ao ar atmosférico e a radicais livres, promovendo também, sua solubilização (Silva et al., 2013). Os valores de higroscopicidade menores que 20%, encontrados neste estudo, classificam os pós obtidos como menos higroscópicos, de acordo com GEA (2003), e se aproximam dos estudo de Cássia et al. (2019) que avaliaram a microencapsulação da mistura de extratos fenólicos de diferentes frutos, incluindo a jabuticaba, encontrando valores de higroscopicidade para os pós de maltodextrina e goma arábica de 10,05 e 14,16, respectivamente, expressa em gramas de umidade absorvida por 100 g de sólidos secos. Os diferentes valores de higroscopicidade estão associados a diferentes tipos e concentrações do agente carreador, taxa e fluxo de alimentação e temperatura de entrada e saída da secagem em *spray dryer* (Tontul & Topuz, 2017).

Os valores obtidos de solubilidade para ambos os pós, assim como na higroscopicidade, também não se diferiram estatisticamente ($p>0,05$). A solubilidade dos pós é um parâmetro importante a ser estudado, pois é considerada um fator decisivo para a qualidade dos pós que serão utilizados como ingredientes na indústria de alimentos. Os microencapsulados pouco solúveis podem causar, além de dificuldades de processamento e incorporação nas matrizes alimentares, perdas econômicas (Mahdi et al., 2020a)

Valores elevados de solubilidade eram esperados, devido à alta solubilidade em água dos agentes encapsulantes utilizados neste estudo. No estudo da microencapsulação por *spray drying* de extrato concentrado de tomate, valores de 77,2% de solubilidade foram encontrados para os pós microencapsulados com maltodextrina (Souza et al., 2018). Já no estudo de Cássia et al. (2019b) com microencapsulação de mistura de diferentes extratos fenólicos (juçara, jabuticaba e

mirtilo), a solubilidade variou entre 87,87% para a maltodextrina e 87,92% para a goma arábica.

3.2.1 Colorimetria dos microencapsulados

A análise colorimétrica dos pós microencapsulados (PMD e PGA) estão descritas na Tabela 3. Para a obtenção destes parâmetros, os pós inicialmente foram reconstituídos em água destilada, até o °Brix inicial das soluções de alimentação (solução 30% do agente carreador + extrato concentrado). Todos os parâmetros analisados (L^* , a^* , b^* , C^* e h°) foram estatisticamente diferentes ($p < 0,05$), para PMD e PGA. Os menores valores de L^* (luminosidade) foram obtidos para a PGA, originando pós de coloração mais escura.

Tabela 3: Parâmetros colorimétricos dos pós microencapsulados e das soluções antes da secagem

Parâmetros colorimétricos				
	PMD	EMD	PGA	EGA
L^*	29,70 ± 0,04 ^a	28,62 ± 0,03	16,91 ± 0,48 ^b	5,47 ± 1,00
a^*	54,20 ± 0,03 ^a	53,15 ± 0,06	41,89 ± 0,66 ^b	39,74 ± 1,33
b^*	44,55 ± 0,20 ^a	40,18 ± 0,02	27,73 ± 0,79 ^b	26,57 ± 0,71
h^*	39,42 ± 0,11 ^a	37,09 ± 0,04	33,50 ± 0,33 ^b	33,77 ± 0,48
C^*	70,16 ± 0,15 ^a	66,63 ± 0,04	50,23 ± 0,28 ^b	47,81 ± 1,45
ΔE	4,62 ± 0,18 ^a	-	2,87 ± 0,74 ^b	-

Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3) para as quatro formulações, sendo PMD e PGA (pós microencapsulados com maltodextrina e goma arábica, respectivamente), EMD e EGA (extrato + agente carreador maltodextrina e goma arábica antes da secagem em *spray dryer*). Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística entre os microencapsulados, pelo teste t ($p < 0,05$).

No parâmetro a^* , PMD obteve os maiores valores, demonstrando uma coloração com tendência mais ao avermelhado. O mesmo comportamento foi observado para os valores de b^* , a tendência ao amarelo foi mais observada para PMD, do que para PGA, estes valores podem estar associados à cor dos carreadores utilizados na preparação dos pós. Em relação ao ângulo da tonalidade (h°), quanto mais próximo ao 0° , mais a coloração vermelha dos pós predomina. Neste caso, mesmo que pequena, foi evidenciada diferença estatística ($p < 0,05$) dos microencapsulados, sendo que para PGA, observou-se valores menores para este

parâmetro. A saturação (C^*), também é um aspecto importante a ser analisado, nela é representada a distância do eixo de luminosidade (L^*), que se inicia em zero, no centro. Para este parâmetro, os valores foram estatisticamente ($p < 0,05$) maiores para PMD, indicando uma maior sensação visual da quantidade de cor.

A diferença global de cor (ΔE) de ambos os pós foram calculados para investigar se o processo de secagem influenciou de forma global na cor inicial dos pigmentos. Segundo (Obón et al., 2009), valores de (ΔE) localizados na faixa de 1,5 a 5, as amostras já podem ser distinguidas, mas, a diferença só é evidente para valores acima de 5. Segundo Silva et al. (2013), valores baixos de ΔE são mais desejáveis para a diferença global de cor, indicando que o pigmento em pó mantém a cor do extrato do qual se originou após a reconstituição.

No geral, baseando-se no ΔE , a diferença de cor dos dois tratamentos (PMD e PGA), foram estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). Entretanto, a diferença global da cor, não foi considerada evidente em comparação com as soluções iniciais antes da secagem, indicando uma boa conservação dos pigmentos microencapsulados, mesmo após a secagem em *spray dryer*. O maior ΔE foi obtido para PMD, quando comparado a PGA ($p < 0,05$). Neste caso, podemos concluir que a microencapsulação com goma arábica, de certa forma, conservou melhor a coloração inicial dos pigmentos após a secagem.

3.2.2 Microestrutura dos microencapsulados

As características tridimensionais dos pós obtidos com diferentes agentes carreadores na microencapsulação do extrato de jabuticaba foram obtidas pela microscopia eletrônica de varredura (SEM), onde, através das fotomicrografias, foi possível avaliar as características morfológicas da superfície de cada tratamento. Foi analisado a presença de rachaduras, rugosidades, fraturas, ou possíveis defeitos que pudessem expor o material, levando a sua degradação e oxidação (Guadarrama-Lezama et al., 2012).

A análise das micrografias (Fig.2) indica que ambos os pós (PMD e PGA) apresentaram estruturas irregulares com tamanhos variáveis. Devido à rápida evaporação da água, e resfriamento, normalmente as partículas apresentam concavidades e rugosidades (Cabral et al., 2018). Essas características foram mais evidenciadas para PMD, no qual as irregularidades foram mais visíveis. Em relação a PGA, foram observadas superfícies mais lisas, menos rugosas, entretanto, assim

como em PMD, foram obtidos tamanhos variados das partículas. As morfologias e superfícies irregulares das micropartículas podem estar relacionadas a diferenças na taxa de alimentação, tamanho de gota e temperatura durante o processo de secagem (MAHDI et al., 2020).

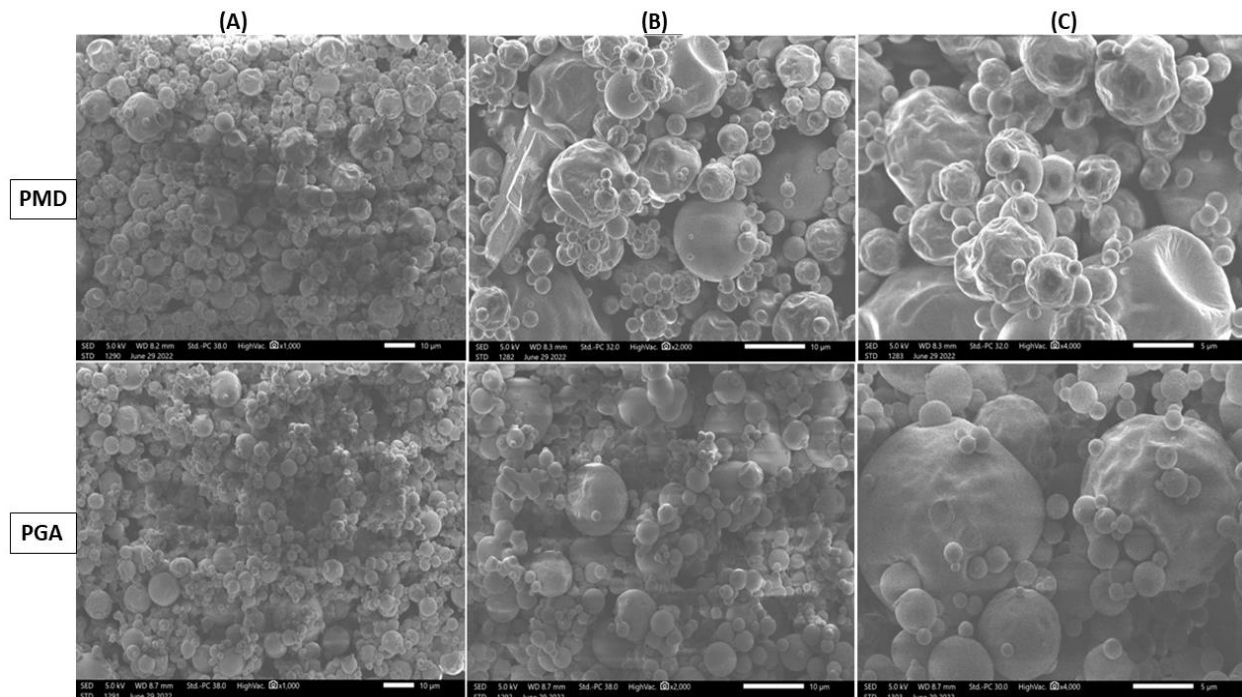


Fig.2: Micrografias dos pós microencapsulados de maltodextrina (MD) e goma arábica (GA). Ampliação: A) 1000x, B) 2000x, C) 4000 x.

Em comparação à morfologia dos pós, partículas lisas e com menores rugosidades são mais recomendadas, pois possuem uma área de contato menor e são menos propensas a sofrer processos de oxidação, protegendo de forma mais efetiva os compostos sensíveis de interesse (Tonon et al., 2010). Outro aspecto importante é o tamanho das partículas obtidas, sendo que, partículas menores possuem uma maior área de superfície exposta resultando em uma degradação mais rápida de compostos sensíveis (Cabral et al., 2018).

Contrário ao presente estudo, Silva et al. (2013), após avaliarem as fotomicrografias de pós microencapsulados do extrato de jaboticaba, observaram melhores características utilizando o material encapsulante maltodextrina, que permitiu a formação de cápsulas mais homogêneas, em comparação com os pós onde a goma arábica e maltodextrina estavam associadas (25% GA e 5% MD).

Pela análise das fotomicrografias de ambos os pós, pode-se observar que PGA obteve os melhores resultados após a microencapsulação, em comparação a PMD,

justamente por apresentar uma morfologia com menos concavidades, rugosidades e reentrâncias, o que protegeria de forma mais eficiente o material de interesse contra as potenciais fontes de degradação, principalmente a oxidação.

3.2.3 Análises térmicas

A análise do comportamento térmico dos sistemas microencapsulados é importante para determinar suas condições de armazenamento, além de estimar a estabilidade das microcápsulas frente a vários processos de aquecimento (Mansour; Salah; Xu, 2020). O comportamento térmico do extrato da jabuticaba (EJB), dos sistemas microencapsulados (PMD e PGA) e dos materiais de parede isolados (MD e GA), avaliado por calorimetria diferencial de varredura é apresentado na Fig.3 (A e B). O EJB apresentou dois picos térmicos na temperatura de 105,6 °C e outro a 158,1 °C. O primeiro pico está relacionado à perda de umidade do extrato, já o segundo, possivelmente à fusão dos compostos fenólicos. Estes valores estão abaixo da temperatura de degradação já observada para compostos fenólicos antioxidantes (180 - 256°C) (Reda, 2011), e para a mistura liofilizada de antocianinas do extrato de jabuticaba (Pereira Souza et al., 2017).

O material de parede isolado (MD), obteve o pico máximo em 234,8 °C. Já a combinação do extrato/material de parede, PMD, apresentou o maior evento térmico em torno 206,2 °C (Fig.3A). Outros autores relataram, picos endotérmicos para a MD entre 193°C a 211°C, associados ao ponto de fusão do material, podendo a variação estar associada principalmente aos diferentes equivalentes de dextrose (DE) da maltodextrina (Pereira Souza et al., 2017; Yazdi et al., 2021).

A Fig.3B, descreve o comportamento térmico da microencapsulação realizada utilizando a goma arábica, no qual, o material de parede isolado GA, apresentou o maior evento térmico em torno 211,8°C, e após a microencapsulação (PGA), em 217,9 °C. Ballesteros et al. (2017), relataram que a microencapsulação por *spray drying* de compostos fenólicos da borra do café, utilizando a goma arábica como material de parede, apresentou temperatura de fusão térmica acima de 225 °C. Os mesmos autores, relataram temperaturas de fusão acima de 190°C para os compostos encapsulados com MD.

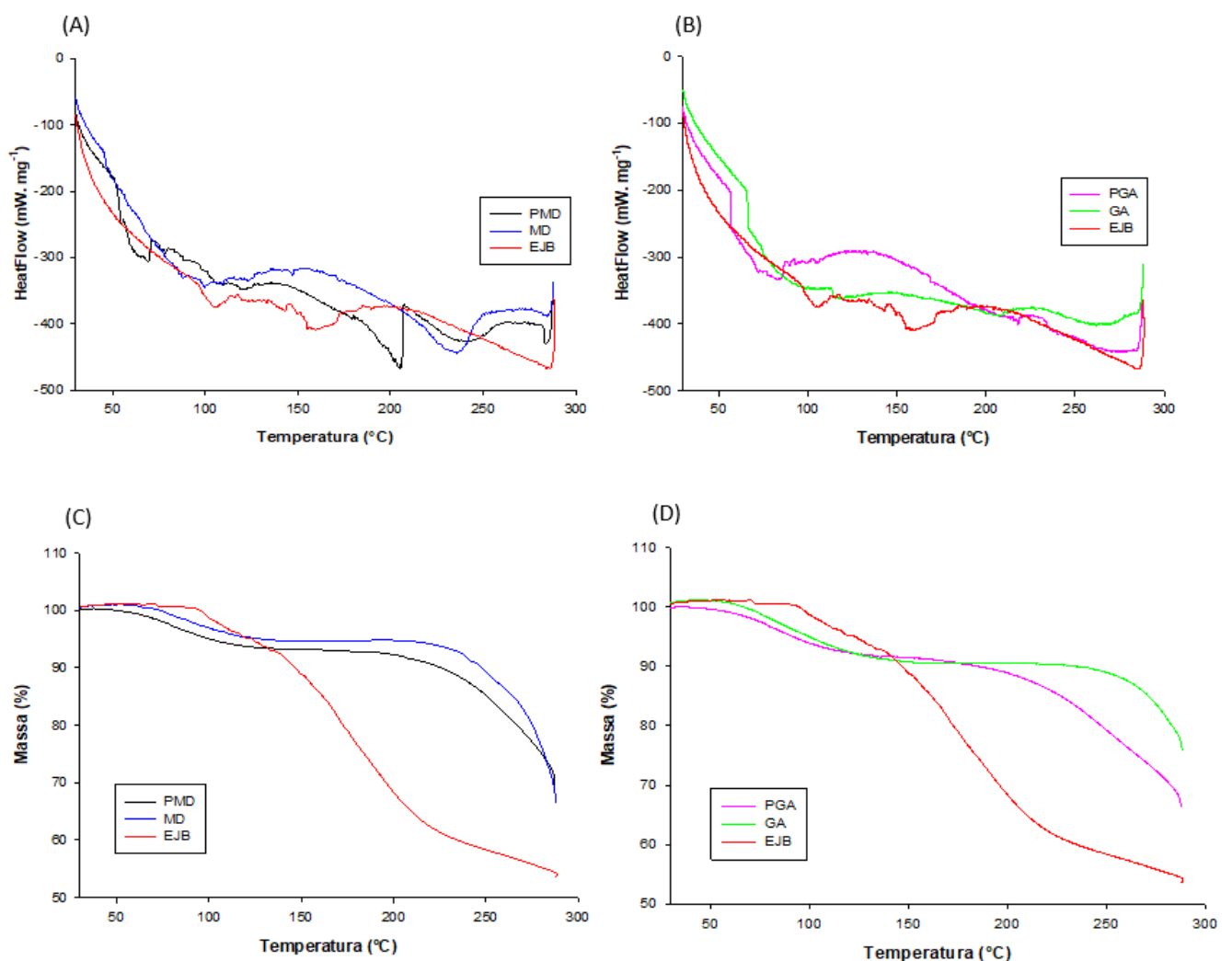


Fig.3: Calorimetria exploratória diferencial (A,B) e análise termogravimétrica (C,D). EJB (extrato da jabuticaba); PMD (microencapsulados de maltodextrina); MD (agente carreador maltodextrina isolado); PGA (microencapsulado de goma arábica) e GA (agente carreador goma arábica isolado).

A redução na temperatura de fusão observada para PMD, quando comparada a MD e o leve aumento na temperatura de fusão de PGA, comparada a GA, indicam uma possível interação entre o material de parede e os compostos encapsulados, que levou conseqüentemente, a mudanças nas propriedades físicas e a formação de complexo, como foi proposto também, por Naidu et al. (2004) e Pereira Souza et al. (2017), levando a mudanças nas propriedades físicas e químicas dos carreadores, interferindo no ponto de fusão térmica comumente observado para os materiais isolados.

De modo geral, independente do material de parede, o EJB atinge maiores resistências térmicas após seu encapsulamento, sendo a goma arábica, o agente encapsulante com maior estabilidade em comparação a maltodextrina. Nos dois casos estabilidade térmica (>200°C), foi alcançada pelas amostras encapsuladas, associadas aos materiais utilizados como revestimento.

Os primeiros eventos térmicos <100 °C, observados, tanto para os microencapsulados quando para os materiais de parede isolados, estão associados principalmente a temperatura de transição vítrea (Tg) desses materiais. Para a goma arábica e maltodextrina, já foram obtidos valores de Tg de 52,83 °C e 39,96 °C, respectivamente (Yousefi et al., 2011). A associação dos dois materiais de parede (MD-GA) para a microencapsulação de antocianinas do chokeberry (*Aronia menalocarpa*), originou valores de Tg de 69,65 °C (Pleczykolan; Kurek, 2019). Quanto maior a Tg, mais estável é o produto em pó durante a produção e armazenamento (Tonon et al., 2009) Na Fig.3A, a Tg observada para o PMD e MD foram de 69°C e 46 °C, respectivamente. Já para PGA e GA, 55 °C e 66°C respectivamente (Fig.3B). Os sistemas microencapsulados apresentaram valores de TG semelhantes, demonstrando que ambos os tratamentos possibilitam adequada estabilidade ao armazenamento potencial uso na incorporação de alimentos.

A perda de massa provocada pelo aumento da temperatura em EJB, dos microencapsulados e dos materiais de parede isolados, foram descritas pela análise de termogravimetria (TGA). O aumento da temperatura levou a perdas na massa no EJB, já em 94,1°C, nas temperaturas próximas a 200 °C, restavam 68% da massa total do extrato. Já para os sistemas microencapsulados (PMD e PGA), (Fig, 3C e Fig.3D), respectivamente, foi observado que a encapsulação provocou menores perdas iniciais de massa do material encapsulado. As perdas iniciais de massa estão relacionadas principalmente a evaporação da água (umidade), em temperaturas

abaixo de 120 °C (Karaaslan et al., 2021). Em 200°C, os dois sistemas microencapsulados, PMD e PGA ainda apresentam, 92 e 89%, respectivamente, da massa total. Os resultados demonstram que, a perda de massa do EJB, foi reduzida após a microencapsulação, reforçando a importância de se encapsular os polifenóis, aumentando a resistência térmica desses compostos.

3.2.4 Cristalinidade

A cristalinidade das microcápsulas relaciona-se diretamente a sua estabilidade, sendo assim, é importante determinar pela DRX, se as microcápsulas têm estruturas cristalinas ou amorfas (Mahdi et al., 2020b).

Para os PMD (Fig.4A), foi observado uma sobreposição sobre MD, indicando que, mesmo com a microencapsulação do extrato da jabuticaba, estruturalmente, o material de parede ainda permaneceu com as características originais, própria da maltodextrina. Assim como observado em PGA (Fig.4B), mesmo com pequenas variações de ângulo, ainda assim, os microencapsulados de goma arábica, permaneceram com as características estruturais semelhantes ao seu controle GA. Esses resultados indicam que, mesmo com a presença dos compostos do extrato, a estrutura do material de parede não foi afetada, corroborando com os resultados da termogravimetria, onde foi possível observar, que o comportamento térmico (DSC) e a perda de massa (TGA) de PMD e PGA, assemelhou-se com seus respectivos controles MD e GA. Neste sentido, a DRX reforçou que a maltodextrina e a goma arábica são bons agentes encapsulantes, e mesmo com a presença do material de núcleo (extrato), as propriedades térmicas dos encapsulantes permanecem estáveis, oferecendo também maior proteção térmica aos bioativos microencapsulados.

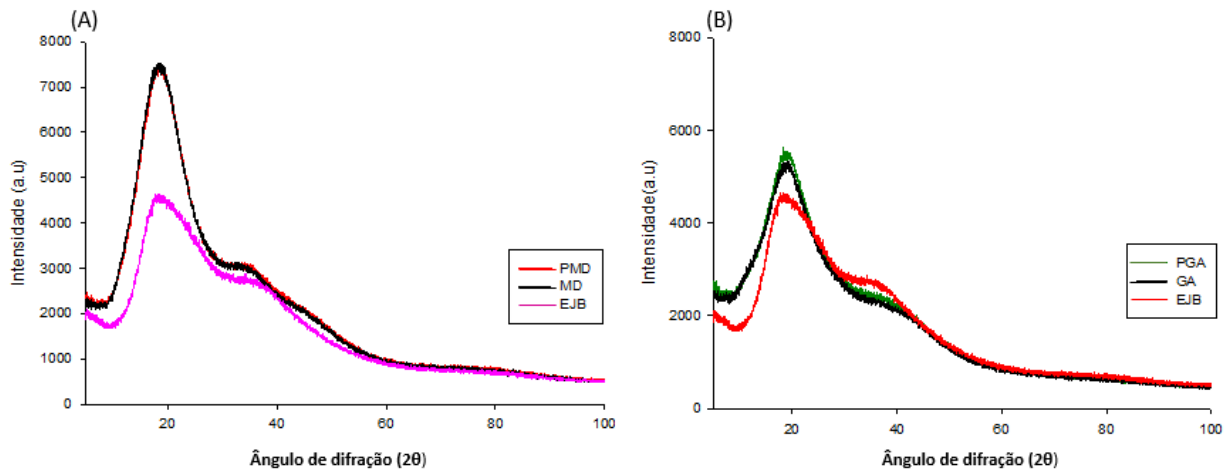


Fig.4: Difratometria de raio x. EJB (extrato da jabuticaba); PMD (microencapsulados de maltodextrina); MD (material de parede maltodextrina isolado); PGA (microencapsulado de goma arábica) e GA (material de parede goma arábica isolado).

Em ambos os casos, percebe-se que a PMD e PGA, apresentam estruturas semicristalinas. Isso pode ser observado pelos picos característicos em ambos os microencapsulados, próximo ao ângulo de 20°, indicando uma estrutura cristalina e outra variação menos acentuada próxima a 40°, indicando uma estrutura amorfa. Quando se observa um perfil de difração de raios X, a presença de picos difusos e grandes é um indicativo de materiais amorfos. Em contraste, materiais cristalinos apresentam picos agudos e bem definidos, pois estão em um estado altamente ordenado (Wang & Zhou, 2015). O EJB, obteve um comportamento semelhante aos microencapsulados, com estrutura que pode ser caracterizada como semicristalina.

No geral os pós secos por pulverização com propriedades cristalinas são preferidos para melhor estabilidade de armazenamento (Wang & Zhou, 2015). As amostras amorfas apresentam uma alta capacidade de absorção de água, o que pode ocasionar problemas durante o armazenamento. Com a absorção de umidade, os açúcares amorfos se convertem em açúcares cristalinos, fazendo com que as amostras formem aglomerados. Essa característica é prejudicial, pois o ganho de peso e a degradação de nutrientes podem ocorrer, bem como o colapso da microestrutura, levando também a instabilidade microbiológica dos pós (Borrmann et al., 2013). Entretanto, este estado é o preferido para microencapsulação de compostos bioativos, por possuir alta viscosidade, reduz a mobilidade das moléculas, impedindo as reações químicas e bioquímicas, preservando os componentes

bioativos dentro das partículas de pó, podendo assim aglomerar de forma mais eficiente o material ativo na matriz da microcápsula (Leyva-Porras et al., 2021).

Nos dois casos, a estrutura semicristalina dos microencapsulados pode oferecer maior estabilidade ao armazenamento devido a cristalinidade parcial, e ainda assim, serem bons agentes encapsulantes de bioativos, devido as características amorfas.

3.2.5 Compostos bioativos, capacidade antioxidante e eficiência de encapsulamento

O conteúdo de fenólicos totais (CFT) dos pós microencapsulados foi significativamente diferente ($p < 0,05$) para os tratamentos, sendo que, o PGA apresentou maior teor em comparação a PMD (Tabela 4). Do contrário, em estudo sobre a microencapsulação do extrato da casca de berinjela, os autores observaram que, o conteúdo de fenólicos microencapsulados com o agente carreador maltodextrina apresentou, mesmo que pequena ($5,22 \text{ mg. g}^{-1}$), quantidades significativamente ($p < 0,05$) maiores quando comparados a goma arábica ($4,57 \text{ mg. g}^{-1}$), associando os resultados ao melhor aprisionamento de polifenóis na estrutura da MD do que da GA (Sarabandi et al., 2019). Estudos associam uma relação positiva entre os polifenóis e a atividade antioxidante (Fujita et al., 2013; Rocha et al., 2019; Tolun et al., 2016b). Em relação ao conteúdo de antocianinas totais (AT) microencapsuladas, não foi observada diferenças significativas ($p > 0,05$) entre PMD e PGA, mostrando que os agentes carreadores se comportaram de forma semelhante na microencapsulação do material de interesse.

Tabela 4: Compostos fenólicos, antocianinas e capacidade antioxidante dos pós microencapsulados

Compostos bioativos	Pós microencapsulados	
	Maltodextrina	Goma arábica
Fenólicos Totais (mg AGE.100 g ⁻¹)	172,73 ± 3,41 ^a	232,63 ± 9,04 ^b
Antocianinas Totais (mg cy-3-gli.100 g ⁻¹)	53,85 ± 1,84 ^a	50,20 ± 2,50 ^a
ABTS (µmol Trolox.g ⁻¹)	20,94 ± 1,32 ^a	33,21 ± 1,68 ^b
DPPH (µmol Trolox.g ⁻¹)	19,19 ± 0,06 ^a	25,71 ± 0,25 ^b
FRAP (µmol sulfato ferroso/g ⁻¹)	39,85 ± 3,21 ^a	86,69 ± 4,40 ^b
EE Fenólicos Totais (%)	82,64± 0,34 ^a	76,62 ± 0,90 ^b
EE Antocianinas Totais (%)	61,71 ± 0,81 ^a	64,39 ± 0,79 ^b

*Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3) para as duas formulações de pós microencapsulados. Maltodextrina (PMD) e goma arábica (PGA), em base seca. Letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística pelo teste t (p < 0,05). AGE: Ácido gálico equivalente; cy-3-gli: cyanidina-3-glicosídeo; ABTS: capacidade de eliminação do cátion ABTS, DPPH: capacidade de eliminação do radical DPPH, FRAP: poder antioxidante de redução do ferro; EE: Eficiência de encapsulamento expressa em porcentagem.

A quantidade de fenólicos totais e antocianinas presentes nas microcápsulas de ambos os agentes carreadores, demonstram potencial utilização para a incorporação em matrizes alimentares diversas, reafirmando que a secagem em *spray dryer* é um importante método para a estabilização e valorização desses compostos. A microencapsulação dos polifenóis, principalmente das antocianinas, facilita sua aplicação como corante natural em alimentos (de Cássia Gomes da Rocha et al., 2023)

Os resultados da capacidade antioxidante (ABTS, DPPH e FRAP) das microcápsulas, também estão descritos na Tabela 4. Para todos os ensaios, o tratamento PGA obteve significativamente (p<0,05) a maior capacidade antioxidante em comparação a PMD. Estes resultados podem estar associados ao maior conteúdo de fenólicos totais, com capacidade redutora, no PGA.

A capacidade antioxidante dos microencapsulados de extratos vegetais, pode variar conforme a proporção de agente carreador e material de núcleo, temperatura de secagem utilizada, diferentes valores de DE (para a maltodextrina), ou a diminuição do conteúdo de polifenóis após a secagem (Mishra et al., 2014; Nguyen et al., 2022; Tolun et al., 2016b).

A obtenção de bioativos microencapsulados com elevada atividade

antioxidante extraídos da casca fruto da jabuticaba e a incorporação em matrizes alimentares, podem prevenir, retardar e até mesmo inibir reações oxidativas e melhorar a qualidade microbiológica do produto (Baldin et al., 2016, 2018). Vale destacar também, os benefícios *in vivo* dos fitoquímicos antioxidantes do fruto, como efeitos antidiarreicos (Souza-Moreira et al., 2011), efeito protetor contra danos hepáticos (Santos et al., 2010), anti-inflamatório (Zhao et al., 2019) resistência à insulina (Lenquist et al., 2012), antiproliferativo (Reynertson et al., 2006) entre outros. Esses estudos reforçam a importância da utilização dos compostos antioxidantes, com potencial aplicação em alimentos.

A eficiência de encapsulamento (EE) indica o quanto o método de encapsulação foi eficiente, e depende principalmente da relação material de parede/núcleo. A EE refere-se ao potencial dos materiais da parede para encapsular ou reter o material do núcleo dentro da microcápsula (Akhavan Mahdavi et al., 2016). No presente estudo, a eficiência de encapsulamento obtida para os fenólicos totais dos PMD, comparado a PGA, foram estatisticamente ($p < 0,05$) maiores, demonstrando que a maltodextrina permitiu uma maior retenção dos bioativos. Entretanto, ao analisar os teores de antocianinas, mesmo que pequena, o agente carreador goma arábica demonstrou estatisticamente ($p < 0,05$) maiores porcentagens de encapsulamento.

A microencapsulação por atomização utilizando a maltodextrina e goma arábica com agentes encapsulantes, (Akhavan Mahdavi et al., 2016) obteve eficiência de encapsulamento que variou de 89,06 a 96,21% para as antocianinas de extrato de bérberis (*Berberis vulgaris*). Já a maltodextrina 20 DE e o hi-maize, apresentaram eficiência de encapsulamento para as antocianinas obtidas do mirtilo (*Vaccinium* spp.), que variou entre 74,40 e 85,22% (Righi da Rosa et al., 2019). Na microencapsulação do extrato da jabuticaba utilizando a associação MD/GA, a EE variou de 83,21 a 99,02%. Segundo os autores, mesmo em temperaturas elevadas, o teor de antocianinas se manteve estáveis, devido a maior proteção dos agentes encapsulantes (Silva et al., 2013).

De modo geral, para este estudo, a eficiência de encapsulamento do conteúdo de fenólicos totais e antocianinas, utilizando os dois agentes encapsulantes, foi satisfatória. Vale destacar que os menores valores de EE das antocianinas encontrados, comparados aos estudos citados acima, deve-se principalmente as diferentes propriedades dos agentes encapsulantes e suas interações com o material

de interesse, juntamente com as características de emulsão e método de secagem. Na secagem por *spray dryer*, as condições como a temperatura de entrada e saída, vazão de alimentação, fluxo de ar, morfologia das partículas, entre outros, influenciam nos resultados da eficiência de encapsulamento (Akhavan Mahdavi et al., 2016; Jafari et al., 2008; Nguyen et al., 2022).

4. CONCLUSÃO

A utilização da maltodextrina e goma arábica como agentes carreadores mostrou-se eficiente para a microencapsulação dos polifenóis da jabuticaba. Os compostos bioativos encapsulados, demonstraram potencial capacidade antioxidante e características físico-químicas adequadas, como valores elevados de solubilidade, menos higroscópicos, parâmetros atrativos de cor e resistência térmica, atributos desejáveis em alimentos em pó e para utilização na indústria de alimentos. A goma arábica destacou-se pelas melhores características dos pós obtidos. Ademais, os polifenóis da jabuticaba microencapsulados podem ser utilizados em matrizes alimentares diversas, na substituição de corantes artificiais, contribuindo também para os aspectos funcionais dos alimentos incorporados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Edital Universal, proc. 409221/2018-0), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES e a cooperação do Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (CAPES/FAPES-PDPG, proc. 2021-5S41N) pelo financiamento do projeto e pela bolsa de estudos.

5. REFERÊNCIAS

- AOAC. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 16. ed. Whashington, 1995.
- Akhavan Mahdavi, S., Jafari, S. M., Assadpoor, E., & Dehnad, D. (2016). Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin, gum Arabic and gelatin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 85, 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.011>
- Albuquerque, B. R., Pereira, C., Calhelha, R. C., José Alves, M., Abreu, R. M. V., Barros, L., Oliveira, M. B. P. P., & Ferreira, I. C. F. R. (2020a). Jabuticaba residues (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) are rich sources of valuable compounds with bioactive properties. *Food Chemistry*, 309(October 2019), 125735.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125735>

- Albuquerque, B. R., Pinela, J., Barros, L., Oliveira, M. B. P. P., & Ferreira, I. C. F. R. (2020). Anthocyanin-rich extract of jaboticaba epicarp as a natural colorant: Optimization of heat- and ultrasound-assisted extractions and application in a bakery product. *Food Chemistry*, 316(February), 126364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126364>
- Alezandro, M. R., Granato, D., & Genovese, M. I. (2013). Jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg), a Brazilian grape-like fruit, improves plasma lipid profile in streptozotocin-mediated oxidative stress in diabetic rats. *Food Research International*, 54(1), 650–659. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.041>
- Baldin, J. C., Michelin, E. C., Polizer, Y. J., Rodrigues, I., de Godoy, S. H. S., Fregonesi, R. P., Pires, M. A., Carvalho, L. T., Fávares-Trindade, C. S., de Lima, C. G., Fernandes, A. M., & Trindade, M. A. (2016). Microencapsulated jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract added to fresh sausage as natural dye with antioxidant and antimicrobial activity. *Meat Science*, 118, 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.016>
- Baldin, J. C., Muneke, P. E. S., Michelin, E. C., Polizer, Y. J., Silva, P. M., Canan, T. M., Pires, M. A., Godoy, S. H. S., Fávares-Trindade, C. S., Lima, C. G., Fernandes, A. M., & Trindade, M. A. (2018). Effect of microencapsulated Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract on quality and storage stability of mortadella sausage. *Food Research International*, 108(March), 551–557. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.076>
- Ballesteros, L. F., Ramirez, M. J., Orrego, C. E., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2017). Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. *Food Chemistry*, 237, 623–631. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.05.142>
- Bernardes, A. L., Moreira, J. A., Tostes, M. das G. V., Costa, N. M. B., Silva, P. I., & Costa, A. G. V. (2019). In vitro bioaccessibility of microencapsulated phenolic compounds of jussara (*Euterpe edulis* Martius) fruit and application in gelatine model-system. *Lwt*, 102(October 2018), 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.009>
- Borges, L. L. R., Oliveira, L. L. de, Freitas, V. V., Leite Júnior, B. R. de C., Nascimento, A. L. A. A., Castro, G. A. D., Fernandes, S. A., & Stringheta, P. C. (2022). Digestive enzymes inhibition, antioxidant and antiglycation activities of phenolic compounds from jaboticaba (*Plinia cauliflora*) peel. *Food Bioscience*, 50, 102195. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2022.102195>
- Borrmann, D., Pierucci, A. P. T. R., Leite, S. G. F., & Leão, M. H. M. D. R. (2013). Microencapsulation of passion fruit (*Passiflora*) juice with n-octenylsuccinate-derivatised starch using spray-drying. *Food and Bioprocess Technology*, 91(1), 23–27. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2012.08.001>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Cabral, B. R. P., de Oliveira, P. M., Gelfuso, G. M., Quintão, T. de S. C., Chaker, J. A., Karnikowski, M. G. de O., & Gris, E. F. (2018). Improving stability of antioxidant compounds from *Plinia cauliflora* (jaboticaba) fruit peel extract by encapsulation in chitosan microparticles. *Journal of Food Engineering*, 238(June), 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.004>
- Cai, Y. Z., & Corke, H. (2000). Production and Properties of Spray-dried Amaranthus Betacyanin Pigments. *Journal of Food Science*, 65(6).
- Cano-Chauca, M., Stringheta, P. C., Ramos, A. M., & Cal-Vidal, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6(4), 420–428. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.003>

- Cássia, J. De, Rocha, G., Augusto, F., Barros, R. De, Tuler, Í., Wanessa, K., Viana, C., Miranda, G., Stephani, R., & César, P. (2019a). Microencapsulation by atomization of the mixture of phenolic extracts. *Powder Technology*, *343*, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.040>
- Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, M. de L., Páez-Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., & Galán-Vidal, C. A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, *113*(4), 859–871. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.001>
- de Cássia Gomes da Rocha, J., Caroline Buttow Rigolon, T., Lorrane Rodrigues Borges, L., Laís Alves Almeida Nascimento, A., de Andrade Neves, N., tuler Perrone, Í., Stephani, R., & César Stringheta, P. (2023). Anthocyanin Stability in a Mix of Phenolic Extracts Microencapsulated by Maltodextrine, Whey Protein and Gum Arabic. *Journal of Food and Nutrition Research*, *11*(1), 1–12. <https://doi.org/10.12691/jfnr-11-1-1>
- de Cássia Sousa Mendes, D., Asquieri, E. R., Batista, R. D., de Moraes, C. C., Ramirez Ascheri, D. P., de Macêdo, I. Y. L., & de Souza Gil, E. (2021). Microencapsulation of jabuticaba extracts (*Myrciaria cauliflora*): Evaluation of their bioactive and thermal properties in cassava starch biscuits. *Lwt*, *137*(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110460>
- Ersus, S., & Yurdagel, U. (2007). *Microencapsulation of anthocyanin pigments of black carrot (Daucuscarota L.) by spray drier*. *80*, 805–812. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.009>
- Fidelis, M., Sousa, J., Bragueto, G., Silva, R., Gomes, A., Mendanha, T., Boscacci, M., Barbosa, J., Araújo, M., Augusto, L., & Almeida, D. (2021a). Polyphenols of jabuticaba [*Myrciaria jaboticaba* (Vell .) O . Berg] seeds incorporated in a yogurt model exert antioxidant activity and modulate gut microbiota of 1 , 2-dimethylhydrazine-induced colon cancer in rats. *Food Chemistry*, *334*(May 2020), 127565. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127565>
- Fujita, A., Borges, K., Correia, R., Franco, B. D. G. de M., & Genovese, M. I. (2013). Impact of spouted bed drying on bioactive compounds, antimicrobial and antioxidant activities of commercial frozen pulp of camu-camu (*Myrciaria dubia* Mc. Vaugh). *Food Research International*, *54*(1), 495–500. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.025>
- Gadioli Tarone, A., Keven Silva, E., Dias de Freitas Queiroz Barros, H., Baú Betim Cazarin, C., & Roberto Marostica Junior, M. (2021). High-intensity ultrasound-assisted recovery of anthocyanins from jabuticaba by-products using green solvents: Effects of ultrasound intensity and solvent composition on the extraction of phenolic compounds. *Food Research International*, *140*(July 2020), 110048. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110048>
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2003). Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems. *Biochemical Engineering Journal*, *14*(3), 217–225. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00221-8](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00221-8)
- GEA Niro Research Laboratory. Analytical Methods Dry Milk Products. GEA Niro Analytical Methods, Methods 14 a and 15 a,” Soeborg, 2003
- Gómez-Mascaraque, L. G., Hernández-Rojas, M., Tarancón, P., Tenon, M., Feuillère, N., Vélez Ruiz, J. F., Fiszman, S., & López-Rubio, A. (2017). Impact of microencapsulation within electrosprayed proteins on the formulation of green tea extract-enriched biscuits. *LWT - Food Science and Technology*, *81*, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.041>
- Guadarrama-Lezama, A. Y., Dorantes-Alvarez, L., Jaramillo-Flores, M. E., Pérez-Alonso, C., Niranjana, K., Gutiérrez-López, G. F., & Alamilla-Beltrán, L. (2012). Preparation and characterization of non-aqueous extracts from chilli (*Capsicum annum* L.) and their

- microencapsulates obtained by spray-drying. *Journal of Food Engineering*, 112(1–2), 29–37. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2012.03.032>
- Gulão, E. da S., de Souza, C. J. F., da Silva, F. A. S., Coimbra, J. S. R., & Garcia-Rojas, E. E. (2014). Complex coacervates obtained from lactoferrin and gum arabic: Formation and characterization. *Food Research International*, 65(PC), 367–374. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2014.08.024>
- Hanhineva, K., Törrönen, R., Bondia-pons, I., & Pekkinen, J. (2010). Impact of Dietary Polyphenols on Carbohydrate Metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 1365–1402. <https://doi.org/10.3390/ijms11041365>
- Hu, Y., Li, Y., Zhang, W., Kou, G., & Zhou, Z. (2018). Physical stability and antioxidant activity of citrus flavonoids in arabic gum-stabilized microcapsules: Modulation of whey protein concentrate. *Food Hydrocolloids*, 77, 588–597. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2017.10.037>
- Ibrahim Silva, P., Stringheta, P. C., Teofilo, R. F., & De Oliveira, I. R. N. (2013). Parameter optimization for spray-drying microencapsulation of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) peel extracts using simultaneous analysis of responses. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 538–544. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.039>
- 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(June). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110518>
- Jafari, S. M., Assadpoor, E., He, Y., & Bhandari, B. (2008). Encapsulation efficiency of food flavours and oils during spray drying. *Drying Technology*, 26(7), 816–835. <https://doi.org/10.1080/07373930802135972>
- Karaaslan, M., Şengün, F., Cansu, Ü., Başığit, B., Sağlam, H., & Karaaslan, A. (2021). Gum arabic/maltodextrin microencapsulation confers peroxidation stability and antimicrobial ability to pepper seed oil. *Food Chemistry*, 337, 127748. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127748>
- Kha, T. C., Nguyen, M. H., & Roach, P. D. (2010). Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of Food Engineering*, 98(3), 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.01.016>
- Khalifa, I., Li, M., Mamet, T., & Li, C. (2019). Maltodextrin or gum Arabic with whey proteins as wall-material blends increased the stability and physiochemical characteristics of mulberry microparticles. *Food Bioscience*, 31(1), 100445. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100445>
- Lacerda Massa, N. M., Dantas Duarte Menezes, F. N., de Albuquerque, T. M. R., de Oliveira, S. P. A., Lima, M. dos S., Magnani, M., & de Souza, E. L. (2020a). Effects of digested jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) by-product on growth and metabolism of *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* indicate prebiotic properties. *LWT*, 131, 109766. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109766>
- Lacerda Massa, N. M., Dantas Duarte Menezes, F. N., de Albuquerque, T. M. R., de Oliveira, S. P. A., Lima, M. dos S., Magnani, M., & de Souza, E. L. (2020b). Effects of digested jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) by-product on growth and metabolism of *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* indicate prebiotic properties. *Lwt*, 131(June), 109766. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109766>
- Lenquiste, S. A., Batista, A. G., Marineli, R. da S., Dragano, N. R. V., & Maróstica, M. R. (2012). Freeze-dried jaboticaba peel added to high-fat diet increases HDL-cholesterol and improves insulin resistance in obese rats. *Food Research International*, 49(1), 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.052>

- Leyva-Porras, C., Saavedra-Leos, M. Z., López-Martínez, L. A., Espinosa-Solis, V., Terán-Figueroa, Y., Toxqui-Terán, A., & Compeán-Martínez, I. (2021). Strawberry juice powders: Effect of spray-drying conditions on the microencapsulation of bioactive components and physicochemical properties. *Molecules*, 26(18). <https://doi.org/10.3390/molecules26185466>
- Li, D., Wang, P., Luo, Y., Zhao, M., & Chen, F. (2017). Health benefits of anthocyanins and molecular mechanisms: Update from recent decade. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(8), 1729–1741. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1030064>
- Lima, E. M. F., Madalão, M. C. M., Benincá, D. B., Saraiva, S. H., & Silva, P. I. (2019). Effect of encapsulating agent and drying air temperature on the characteristics of microcapsules of anthocyanins and polyphenols from juçara (*Euterpe edulis* Martius). *International Food Research Journal*, 26(2), 607–617.
- Loi, C. C., Eyres, G. T., Silcock, P., & Birch, E. J. (2020). Preparation and characterisation of a novel emulsifier system based on glycerol monooleate by spray-drying. *Journal of Food Engineering*, 285, 110100. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2020.110100>
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2020). Microencapsulation of Pineapple Peel Extract by. *Foods*, 9, 718.
- Mahdi, A. A., Mohammed, J. K., Al-Ansi, W., Ghaleb, A. D. S., Al-Maqtari, Q. A., Ma, M., Ahmed, M. I., & Wang, H. (2020a). Microencapsulation of fingered citron extract with gum arabic, modified starch, whey protein, and maltodextrin using spray drying. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 1125–1134. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.10.201>
- Mansour, M., Salah, M., & Xu, X. (2020). Effect of microencapsulation using soy protein isolate and gum arabic as wall material on red raspberry anthocyanin stability, characterization, and simulated gastrointestinal conditions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104927. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2019.104927>
- Marquetti, C., Dos Santos, T. B., Kaipers, K. F. C., Böger, B. R., Tonial, I. B., Wagner Junior, A., Lucchetta, L., & Do Prado, N. V. (2018). Jaboticaba skin flour: Analysis and sustainable alternative source to incorporate bioactive compounds and increase the nutritional value of cookies. *Food Science and Technology*, 38(4), 629–638. <https://doi.org/10.1590/fst.06717>
- Mishra, P., Mishra, S., & Mahanta, C. L. (2014). Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Emblica officinalis*) juice powder. *Food and Bioprocess Processing*, 92(3), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.003>
- Montes, C., Vicario, I. M., Raymundo, M., Fett, R., & Heredia, F. J. (2005). Application of tristimulus colorimetry to optimize the extraction of anthocyanins from Jaboticaba (*Myrcia Jaboticaba* Berg.). *Food Research International* 38, 38, 983–988. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.01.016>
- Morais, M. L., Silva, A. C. R., Araújo, C. R. R., Esteves, E. A., & Dessimoni-Pinto, N. A. V. (2013). Determinação do potencial antioxidante in vitro de frutos do cerrado Brasileiro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35(2), 355–360. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000200004>
- Morales, P., Barros, L., Dias, M. I., Santos-Buelga, C., Ferreira, I. C. F. R., Ramirez Asquiere, E., & Berrios, J. D. J. (2016). Non-fermented and fermented jaboticaba (*Myrciaria cauliflora* Mart.) pomaces as valuable sources of functional ingredients. *Food Chemistry*, 208, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.011>
- Naidu, N. B., Chowdary, K. P. R., Murthy, K. V. R., Satyanarayana, V., Hayman, A. R., & Becket, G. (2004). Physicochemical characterization and dissolution properties of

- meloxicam–cyclodextrin binary systems. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 35(1), 75–86. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2004.01.003>
- Neves, N. de A., Stringheta, P. C., Gómez-Alonso, S., & Hermosín-Gutiérrez, I. (2018). Flavonols and ellagic acid derivatives in peels of different species of jaboticaba (*Plinia* spp.) identified by HPLC-DAD-ESI/MSn. *Food Chemistry*, 252, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.078>
- Nguyen, Q. D., Dang, T. T., Nguyen, T. V. L., Nguyen, T. T. D., & Nguyen, N. N. (2022). Microencapsulation of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) anthocyanins: Effects of drying conditions on some physicochemical properties and antioxidant activities of spray-dried powder. *Food Science and Nutrition*, 10(1), 191–203. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2659>
- Nthimole, C. T., Kaseke, T., & Fawole, O. A. (2022). Micro-Encapsulation and Characterization of Anthocyanin-Rich Raspberry Juice Powder for Potential Applications in the Food Industry. *Processes*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/pr10051038>
- Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M., & Fernández-López, J. A. (2009). Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.013>
- Oliveira, A., Alexandre, E. M. C., Coelho, M., Lopes, C., Almeida, D. P. F., & Pintado, M. (2015). Incorporation of strawberries preparation in yoghurt: Impact on phytochemicals and milk proteins. *Food Chemistry*, 171, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.107>
- Pereira Souza, A. C., Deyse Gurak, P., & Damasceno Ferreira Marczak, L. (2017). Maltodextrin, pectin and soy protein isolate as carrier agents in the encapsulation of anthocyanins-rich extract from jaboticaba pomace. *Food and Bioprocess Processing*, 102, 186–194. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2016.12.012>
- Pieczkolan, E., & Kurek, M. A. (2019). Use of guar gum, gum arabic, pectin, beta-glucan and inulin for microencapsulation of anthocyanins from chokeberry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 665–671. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.02.073>
- Plaza, M., Batista, Â. G., Cazarin, C. B. B., Sandahl, M., Turner, C., Östman, E., & Maróstica Júnior, M. R. (2016). Characterization of antioxidant polyphenols from *Myrciaria jaboticaba* peel and their effects on glucose metabolism and antioxidant status: A pilot clinical study. *Food Chemistry*, 211, 185–197. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.142>
- Resende, L. M., Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2020). Characterization of jaboticaba (*Plinia cauliflora*) peel flours and prediction of compounds by FTIR analysis. *LWT*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110135>
- Resende, L. M., Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2023). Polyphenols in Jaboticaba (*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>
- Reynertson, K. A., Wallace, A. M., Adachi, S., Gil, R. R., Yang, H., Basile, M. J., D'Armiento, J., Weinstein, I. B., & Kennelly, E. J. (2006). Bioactive depsides and anthocyanins from jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*). *Journal of Natural Products*, 69(8), 1228–1230. <https://doi.org/10.1021/np0600999>
- Righi da Rosa, J., Nunes, G. L., Motta, M. H., Fortes, J. P., Cezimbra Weis, G. C., Rychcki Hecktheuer, L. H., Muller, E. I., Ragagnin de Menezes, C., & Severo da Rosa, C. (2019). Microencapsulation of anthocyanin compounds extracted from blueberry

- (*Vaccinium* spp.) by spray drying: Characterization, stability and simulated gastrointestinal conditions. *Food Hydrocolloids*, 89, 742–748. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.11.042>
- Robert, P., Gorena, T., Romero, N., Sepulveda, E., Chavez, J., & Saenz, C. (2010). Encapsulation of polyphenols and anthocyanins from pomegranate (*Punica granatum*) by spray drying. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(7), 1386–1394. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02270.x>
- Rocha, J. de C. G., de Barros, F. A. R., Perrone, Í. T., Viana, K. W. C., Tavares, G. M., Stephani, R., & Stringheta, P. C. (2019). Microencapsulation by atomization of the mixture of phenolic extracts. *Powder Technology*, 343, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.040>
- Rutz, J. K., Zambiasi, R. C., Borges, C. D., Krumreich, F. D., Da Luz, S. R., Hartwig, N., & Da Rosa, C. G. (2013). Microencapsulation of purple Brazilian cherry juice in xanthan, tara gums and xanthan-tara hydrogel matrixes. *Carbohydrate Polymers*, 98(2), 1256–1265. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.058>
- Santos, D. T., Veggi, P. C., & Meireles, M. A. A. (2010). Extraction of antioxidant compounds from Jaboticaba (*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>
- Sarabandi, K., Jafari, S. M., Mahoonak, A. S., & Mohammadi, A. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of eggplant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.133>
- Scioli, G., Della Valle, A., Zengin, G., Locatelli, M., Tartaglia, A., Cichelli, A., Stefanucci, A., & Mollica, A. (2022). Artisanal fortified beers: Brewing, enrichment, HPLC-DAD analysis and preliminary screening of antioxidant and enzymatic inhibitory activities. *Food Bioscience*, 48(January), 101721. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101721>
- Silva, P. I., Stringheta, P. C., Teófilo, R. F., & De Oliveira, I. R. N. (2013). Parameter optimization for spray-drying microencapsulation of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) peel extracts using simultaneous analysis of responses. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 538–544. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.039>
- Singleton VL, Rossi JAJR. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. *Am J Enol Viticult.* 1965;16:144–158.
- Souza, A. L. R., Hidalgo-Chávez, D. W., Pontes, S. M., Gomes, F. S., Cabral, L. M. C., & Tonon, R. V. (2018). Microencapsulation by spray drying of a lycopene-rich tomato concentrate: Characterization and stability. *Lwt*, 91(February), 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.053>
- Souza-Moreira, T. M., Severi, J. A., Santos, E., Silva, V. Y. A., Vilegas, W., Salgado, H. R. N., & Pietro, R. C. L. R. (2011). Chemical and antidiarrheal studies of plinia cauliflora. *Journal of Medicinal Food*, 14(12), 1590–1596. <https://doi.org/10.1089/jmf.2010.0265>
- Tolun, A., Altintas, Z., & Artik, N. (2016a). Microencapsulation of grape polyphenols using maltodextrin and gum arabic as two alternative coating materials: Development and characterization. *Journal of Biotechnology*, 239, 23–33. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTEC.2016.10.001>
- Tonon, R. V., Baroni, A. F., Brabet, C., Gibert, O., Pallet, D., & Hubinger, M. D. (2009). Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice. *Journal of Food Engineering*, 94(3–4), 215–221. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2009.03.009>
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2010). Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different

- carrier agents. *Food Research International*, 43(3), 907–914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.013>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Em Trends in Food Science and Technology* (Vol. 63, p. 91–102). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Wang, W., & Zhou, W. (2015). Characterisation of spray dried soy sauce powders made by adding crystalline carbohydrates to drying carrier. *Food Chemistry*, 168, 417–422. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.07.065>
- Xiao, Z., Xia, J., Zhao, Q., Niu, Y., & Zhao, D. (2022). Maltodextrin as wall material for microcapsules: A review. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120113. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120113>
- Yazdi, A. P. G., Barzegar, M., Sahari, M. A., & Ahmadi Gavlighi, H. (2021). Encapsulation of Pistachio Green Hull Phenolic Compounds by Spray Drying. *Em J. Agr. Sci. Tech* (Vol. 23, Número 1).
- Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z., & Mousavi, S. M. (2011). Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica Granatum L.*). *Journal of Food Science and Technology*, 48(6), 677–684. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0195-x>
- Youssef REDA, S. (2011). *Evaluation of antioxidants stability by thermal analysis and its protective effect in heated edible vegetable oil*. 31(2), 475–480. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=395940105030>
- Zhao, D. K., Shi, Y. N., Petrova, V., Yue, G. G. L., Negrin, A., Wu, S. B., D'Armiento, J. M., Lau, C. B. S., & Kennelly, E. J. (2019). Jaboticabin and Related Polyphenols from Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) with Anti-inflammatory Activity for Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(5), 1513–1520. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05814>

ARTIGO 2

Incorporação dos polifénóis microencapsulados extraídos da casca da jabuticaba (*Plinia spp.*) em bebida láctea: estabilidade, bioacessibilidade *in vitro* e resposta glicêmica

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi incorporar compostos bioativos extraídos de casca de jabuticaba na forma de extrato concentrado (EJB) e pós microencapsulados com maltodextrina (PMD) e goma arábica (PGA), em sistema modelo de bebida láctea, avaliando sua estabilidade, bioacessibilidade e resposta glicêmica. Características físico-químicas como pH, acidez, colorimetria, fenólicos totais e antocianinas totais, capacidade antioxidante, cinética de degradação e tempo de meia vida das antocianinas, bioacessibilidade *in vitro* e a resposta glicêmica pós-prandial em indivíduos saudáveis foram avaliadas. As formulações de bebidas incorporadas com polifenóis (PMD, PGA e EJB) e a bebida controle (BLC) mantiveram seu pH e acidez estáveis ao longo de 28 dias de armazenamento. Em relação à cor, o parâmetro a^* , considerado o mais relevante para o estudo, reduziu significativamente ($p < 0,05$), para todas as formulações de bebida, relacionando-se diretamente com degradação significativa ($p < 0,05$) das antocianinas incorporadas, avaliadas ao longo do armazenamento. O conteúdo de fenólicos totais foi constante durante todo o armazenamento, assim como a capacidade antioxidante. No ensaio da bioacessibilidade dos polifenóis incorporados houve aumento dos fenólicos e antocianinas ($p < 0,05$) em todas as formulações, após a simulação da digestão gastrointestinal. A resposta glicêmica demonstrou que as menores áreas incrementais da glicose, em comparação à bebida controle (BLC) foram obtidas para PGA e EJB, demonstrando que os polifenóis apresentam potencial para a redução da absorção pós-prandial da glicose. Os polifenóis extraídos da casca da jabuticaba, incorporados em bebida láctea, apresentam boa estabilidade ao armazenamento, além de contribuir para os aspectos funcionais do produto.

Palavras-chave: atividade antioxidante, antocianinas, biorresíduo, colorimetria, resposta glicêmica

1. INTRODUÇÃO

A jabuticaba (*Plinia spp.*) pertence à família Myrtaceae e, é uma fruta brasileira encontrada principalmente na Mata Atlântica, mas é amplamente cultivada em todo o país. O fruto maduro possui características como polpa esbranquiçada com sabor doce e adstringente devido ao seu alto teor de açúcares e ácidos (Neves et al., 2018). Diferentemente da polpa, as cascas e sementes da jabuticaba não são comumente consumidas, sendo considerados resíduos do processamento, em que ocorrem perdas de até 50% (Morales et al., 2016). Apenas a casca equivale a 30% do peso total do fruto, destacando-se por concentrar a maior parte dos fitoquímicos da jabuticaba (Quatrin et al., 2020).

O resíduo do epicarpo, principalmente as cascas do fruto, tem se mostrado uma excelente fonte de compostos fenólicos, como antocianinas (cianidina-3-O-glicosídeo e delphinidina-3-O-glicosídeo) e derivados do ácido elágico, tocoferóis e taninos (Albuquerque et al., 2020; Quatrin et al., 2019).

Os fitoquímicos extraídos da jabuticaba apresentam grande potencial tecnológico tanto na substituição de corantes sintéticos, quanto na promoção da saúde. No entanto, seu uso se torna limitado principalmente pela instabilidade destes compostos, frente aos fatores degradativos, como diferentes condições de processamento e armazenamento, temperatura, luz, e oxigênio (Cabral et al., 2018).

A tecnologia de microencapsulação em *spray drying* pode contribuir para uma maior estabilidade desses compostos. Nesse método, o material de interesse (núcleo), é encapsulado por um material circundante (material de parede), garantindo uma maior proteção dos compostos de interesse (Cássia et al., 2019). Neste sentido, microencapsulação garante uma liberação direcionada dos compostos bioativos de interesse durante a digestão gastrointestinal, oferecendo maior proteção aos fitoquímicos, permitindo a maior absorção destes pelo trato gastrointestinal e obtendo-se o efeito desejado (Heidebach et al., 2012).

Os compostos encontrados na casca da jabuticaba estão associados a benefícios a saúde, como anti-inflamatórios, hipoglicemiantes, moduladores lipídicos e cardioprotetores (Moura et al., 2018; Romão et al., 2019; Trindade et al., 2022), melhora da sensibilidade a insulina (Dragano et al., 2013; Lenquiste et al., 2012), inibição das enzimas digestivas (Borges et al., 2022) e propriedades quimiopreventivas (Holkem et al., 2021). Os polifenóis, comumente encontrados na

jabuticaba, estão envolvidos na diminuição da glicemia plasmática, e seu efeito hipoglicemiante também é relatado em vários estudos *in vitro* e *in vivo*. A inibição da α -amilase e α -glicosidase, enzimas envolvidas no metabolismo de carboidratos, contribuindo para a redução do exacerbado da glicose plasmática pós-prandial (Annunziata et al., 2020; Fidelis et al., 2021), inibição do transporte de glicose para os enterócitos (Kim et al., 2016; Mrabti et al., 2019), redução da secreção de insulina (Szkudelski, 2008), e diminuindo a absorção de glicose (Manzano & Williamson, 2010). Além disso, são relatadas aplicações dos polifenóis da jabuticaba na indústria de alimentos, como em produtos cárneos (de Almeida et al. 2015; Baldin et al. 2018), em panificados (Marquetti et al., 2018) e produtos lácteos (Fidelis et al. 2021; Freitas-Sá et al. 2018; Di Maio et al. 2019; Pinto et al. 2023; Rocha et al. 2019; de Sá et al. 2014; Saito et al., 2019).

Há grande interesse em incorporar polifenóis em produtos lácteos, como forma de torná-los mais atrativos. A bebida láctea, apresenta características sensoriais semelhantes às do iogurte, além de demonstrarem potencial de utilização do soro de leite, considerado um subproduto da produção do queijo, sua utilização reduz e até elimina seu impacto ambiental gerado pelo seu descarte incorreto, além disso, pode originar diferentes formulações alimentícias, sensorialmente agradáveis, nutritivas e de baixo custo ao consumidor (Silva et al., 2017).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi incorporar compostos bioativos extraídos de casca de jabuticaba na forma de extrato concentrado e pós microencapsulados com maltodextrina e goma arábica, em sistema modelo de bebida láctea, avaliando sua estabilidade, bioacessibilidade e resposta glicêmica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

Os frutos da jabuticaba (*Plinia spp.*) produzidas na zona rural do município de Sabará - MG, Brasil (19° 53' 21" Sul, Longitude: 43° 48' 17" Oeste), foram adquiridos em novembro de 2021. O fruto inteiro foi recebido *in natura*, higienizado e a obtenção das cascas foi feita por despulpamento manual. As cascas foram armazenadas a -18 ± 2 °C, até a obtenção dos extratos e a realização das análises.

Os reagentes, 2,2'azinobis-(3etilbenzotiazolin-6sulphonic) acid (ABTS), 2,4,6-tripiridil-s-triazina (TPTZ), 2,2-difenil-1-picril-hidrazil (DPPH), ácido 6-hidroxi-2,5,7,8 tetrametilcroman-2-carboxílico (Trolox), sais biliares, as enzimas alfa-amilase, pepsina, pancreatina, foram obtidos da Sigma-Adrich (Germany). Ácido gálico, carbonato de sódio, cloreto de sódio, álcool etílico e reagente para fenol Folin-Ciocalteau foram adquiridos de Dinâmica Química Contemporânea (Brasil). Cloreto férrico, cloreto de alumínio, nitrito de sódio, hidróxido de sódio, persulfato de potássio e sulfato ferroso foram adquiridos da Neon (Brasil). Para o controle de glicemia capilar foi utilizado o aparelho glicosímetro (Accu-Chek Active) e lancetas e fitas (Accu-Chek Softclix). Todos os reagentes foram de grau analítico ou HPLC. Os agentes carreadores utilizados foram goma arábica (Labsynth, Brasil) e a maltodextrina 10 DE (Absolut Indústria, Brasil).

Para a formulação das bebidas lácteas foram utilizados leite UHT (Selita, Brasil), açúcar cristal (Delta, Brasil), cultura láctea liofilizada para iogurte (*Streptococcus salivarius ssp. thermophilus* e *Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus*) (Rica Nata, Brasil), aroma artificial de morango (Adicel, Brasil). O soro de leite foi adquirido do setor de laticínios do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), campus Alegre-ES.

2.2 Obtenção do extrato concentrado de jabuticaba e dos microencapsulados

O extrato rico em fitoquímicos (EJB), foi obtido a partir da metodologia proposta por (Lima et al. (2019)). As cascas da jabuticaba foram previamente trituradas com o auxílio de mixer (Britânia, Ultra Mixer), e foram adicionadas ao solvente extrator etanol 80% (v/v), na proporção de resíduo:solvente de 1:10 (m/v). Após, o extrato foi levado ao ultrassom de banho (Ultrasonic Power IGBT, CTA do Brasil), a potência de 900W e temperatura de 35°C/30min. O extrato foi filtrado a vácuo em papel Whatman 1. Em

seguida, concentrado, utilizando um evaporador rotatório a vácuo (Fisatom 801, São Paulo, Brasil), para a remoção de todo o etanol residual. O teor de sólidos solúveis (SST), expresso em °Brix, foi medido durante a evaporação rotativa, para verificar a finalização do processo. Ao final, o extrato concentrado foi acondicionado em frasco âmbar e armazenado em freezer (-18 ± 2 °C) para posterior realização das análises. A extração foi repetida até a obtenção de volume suficiente de extrato para o experimento.

2.3 Microencapsulação do extrato em secagem por *spray dryer*

A goma arábica e a maltodextrina 10 DE foram utilizados como os agentes carreadores da microencapsulação. A concentração final das soluções de material de parede foi de 30% (m/v). O extrato concentrado do resíduo de jabuticaba obtido (EJB) no item 2.2, foi adicionado ao agente carreador com proporção de 1:3, ou seja, uma parte de extrato, para três partes de agente encapsulante.

Para homogeneização das misturas de extratos e agentes encapsulantes, foi utilizado agitador (KASVI, K40-1810H, Brasil), a 30 °C. O pH das soluções antes da secagem, foi ajustado utilizando o ácido cítrico saturado até pH 3. A secagem ocorreu em *spray dryer* (YAMATO, Modelo ADL 3115, China) (SILVA et al., 2013). A temperatura de entrada foi de 180 °C e a de saída variando entre 70 ± 5 °C, a pressão manométrica máxima do ar comprimido de 0,1 MPa, vazão de alimentação de 3,7 mL/min e fluxo do ar de secagem igual a 0,21 m³/min. Após a secagem, os pós microencapsulados com goma arábica (PGA) e maltodextrina (PMD) foram armazenados sob refrigeração (-18 ± 2 °C) em embalagens de polietileno revestidas com camada laminada. A secagem foi repetida até a obtenção de volume suficiente de microencapsulados para o experimento.

2.4 Formulação do sistema modelo de bebida láctea fermentada

A formulação da bebida láctea fermentada foi conduzida segundo o método proposto por Lima et al. (2019). Utilizou-se 60% de leite UHT e 40% de soro de leite constituindo a base láctea. A proporção de açúcar foi 12% e aromatizante comercial de morango 0,1%, calculados de acordo com a base láctea, segundo as recomendações do fabricante. Para a incorporação da cultura láctea, 2 g do fermento em pó foram previamente diluídos em 500 mL de leite UHT, em seguida, fracionado

em tubos Falcon de 50 mL, conforme orientado pelo fabricante e armazenados em congelador a $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

O soro de leite utilizado, foi filtrado e aquecido a 65°C , para promover a remoção de impurezas e para inativação do coalho residual proveniente da fabricação do queijo, evitando interferências no processo. Posteriormente, o açúcar foi incorporado no soro, e a mistura pasteurizada em banho-térmico a 65°C por 30 minutos. Em seguida a mistura pasteurizada foi resfriada a 40°C em banho de gelo, e realizada a adição do leite UHT e de 100 mL da cultura láctica diluída. A fermentação ocorreu em estufa (Solab SL 101), a $42 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 9 horas, até atingir a acidez entre 60 a 80°Dornic .

Após a fermentação, foi realizada a quebra do coágulo e a adição do aromatizante comercial de morango. O extrato concentrado de jabuticaba (EJB), e os pós microencapsulados com maltodextrina (PMD) e goma arábica (PGA) foram incorporados na proporção de 5% (m/m) na bebida (Lima et al., 2019). A homogeneização para a completa solubilização dos pós e extrato foi realizada em agitador magnético (KASVI, K40-1810H, Brasil).

No total, obtiveram-se quatro formulações de bebida láctea fermentada, sendo a BLC (bebida láctea controle, sem a adição dos extratos e pós), EJB (bebida láctea com incorporação do extrato concentrado de jabuticaba), PMD (bebida láctea com incorporação dos microencapsulados com maltodextrina) e PGA (bebida láctea com incorporação de microencapsulados com goma arábica).

As formulações foram então envasadas em embalagens opacas de polietileno de 100 mL, previamente sanitizadas em solução de hipoclorito de sódio a 200 mg/L, e mantidas em BOD sob refrigeração ($10 \pm 2^{\circ}\text{C}$), até o momento das análises.

2.5 Estabilidade do sistema modelo de bebida láctea

A estabilidade das formulações das bebidas lácteas, foi avaliada durante os tempos zero, 7, 14, 21 e 28 dias de armazenamento, baseando-se no prazo de validade comumente observado para os produtos comerciais. (Lima et al. 2019). As bebidas foram analisadas conforme descrito a seguir, em triplicata e os dados expressos em média \pm desvio padrão, em base seca.

2.5.1. Acidez total titulável e potencial hidrogeniônico

A determinação da acidez e do pH, seguiu os padrões analíticos do Instituto Adolfo Lutz (2004), sendo que para a acidez foi utilizado a solução de NaOH 0,1 mol/L e os resultados foram expressos em g de ácido láctico por 100 g de bebida. Já o pH, foi determinado em potenciômetro digital (PHS-3E, Satra) previamente calibrado, por meio da dissolução de 10 mL da amostra em 100 mL de água destilada.

2.5.2. Análises colorimétricas

O colorímetro (Konica Minolta, CR-5, Japão) foi utilizado para medir os parâmetros colorimétricos, no sistema CIELAB com iluminante D₆₅ e ângulo de observação de 10°, com o objetivo de verificar a perda de cor das formulações de bebidas lácteas ao longo de 28 dias de armazenamento. Foram realizadas leituras diretas no modo reflectância das coordenadas “L*” - luminosidade (0 = preto e 100 = branco), “a*” - intensidade de vermelho (+) e verde (-), e, “b*” - intensidade de amarelo (+) e azul (-). O ângulo de tonalidade cromática (h) e saturação de cor ou chroma (C*) foram calculados pelas Equações (1) e (2).

$$h^{\circ} = \tan^{-1} (b^*/a^*) \quad (\text{Eq.1})$$

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

A variação global de cor (ΔE), foi calculada para verificar as perdas de coloração da bebida durante o armazenamento, segundo a Equação 4:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Eq.3})$$

Em que: ΔE é a diferença global de cor; ΔL^* é a variação da coordenada L*; Δa^* é a variação da coordenada a*; Δb^* é a variação da coordenada b*.

2.5.3 Compostos bioativos e capacidade antioxidante da bebida

Na bebida láctea, durante todo o período de armazenamento, os pigmentos e compostos bioativos foram extraídos conforme proposto por Prudêncio et al. (2008) e Lima et al. (2019b), com pequenas modificações, onde utilizou-se uma solução de etanol: HCl 1,5 N (85:15 v/v), a pH 1, na proporção bebida: solução extrativa de 3:4 (v/v). Após, a amostra com a solução extrativa de etanol foi centrifugada (Z326K, Herme, Alemanha) por 45 min em tubos Falcon, a 5000 g a 11 °C e, posteriormente

os extratos foram filtrados a vácuo. Os extratos filtrados foram armazenados sob refrigeração ($-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$), até o momento das análises.

2.5.3.1 Conteúdo de fenólicos totais

O conteúdo de fenólicos totais (CFT), das formulações de bebida láctea foram determinados pelo método colorimétrico utilizando o reagente Folin Ciocalteu, baseado Singleton, Rossi e Jr (1965). Inicialmente, foi adicionada uma alíquota de 0,6 mL de cada extrato em 3,0 mL de reagente Folin Ciocalteu previamente diluído em água destilada (1:10; v/v). Após 3 minutos de repouso ao abrigo da luz, foram adicionados 2,4 mL de solução saturada de Na_2CO_3 . A absorvância utilizada na determinação foi de 760 nm pelo espectrofotômetro (Multiskan GO, Thermo Scientific, Finlândia) após 1 hora de repouso em ausência de luz. A curva padrão de ácido gálico (0-150 mg/L) foi utilizada para a determinação e os resultados expressos em ácido gálico equivalente ($\text{mg AGE} \cdot 100\text{g}^{-1}$), em base seca.

2.5.3.2 Antocianinas totais

Utilizou-se a metodologia proposta por Fuleki & Francis (1968) para a determinação do teor de antocianinas totais. As bebidas lácteas previamente extraídas descritas no item 2.5.3, foram diluídas em água destilada em um balão de 10 mL, e a leitura realizada em espectrofotômetro (Thermo Fisher Scientific, Estados Unidos) a 535 nm (coeficiente de extinção molar: $26.900 \text{ L/mol}\cdot\text{cm}$; peso molecular: $449,2 \text{ g/mol}$). O teor de antocianinas totais foi expresso em mg de cianidina-3-glicosídeo/100 g de amostra ($\text{mg c-3-g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), em base seca.

2.5.3.3 Capacidade antioxidante – ABTS

O método de ensaio do radical ABTS (ácido 2,2'-azinobis- (3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)) para a quantificação da capacidade antioxidante das bebidas lácteas, foi conduzido de acordo com Re et al. (1999). Foram adicionados 3,5 mL da solução radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$, (absorvância corrigida para 0,700 ($\pm 0,05$) com adição de etanol 80%) com 0,5 mL da amostra, ao abrigo da luz. A realização da leitura foi feita a 734 nm após 6 minutos de reação em espectrofotômetro (Thermo Fisher Scientific, Evolution 300 UV-Vis, Estados Unidos). O Trolox foi utilizado como padrão (0-150 $\mu\text{mol/L}$) e os resultados expressos em equivalente de Trolox ($\mu\text{mol Trolox} \cdot \text{g}^{-1}$), em base seca.

2.5.3.4 Capacidade antioxidante – DPPH

O ensaio DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) seguiu o método proposto por Brand-Williams et al. (1995). Adicionou-se 3,5 mL da solução de DPPH (absorbância corrigida para 0,700 (\pm 0,05) com adição de etanol 80%) em 0,5 mL. As amostras foram abrigadas da luz e as medidas de absorbância realizadas em espectrofotômetro a 515 nm. O Trolox foi utilizado como padrão (0-150 $\mu\text{mol/L}$) e os resultados foram expressos em equivalente de Trolox ($\mu\text{mol Trolox.g}^{-1}$), em base seca.

2.5.3.5 Capacidade antioxidante – FRAP

A capacidade antioxidante avaliada pelo potencial de redução do ferro, seguiu a metodologia proposta de Morais et al. (2013). Foram adicionados 0,90 mL das amostras, 0,27 mL de água destilada e 2,70 mL de reagente FRAP previamente preparado, em tubo de ensaio. Após 30 min de incubação a 37 °C, os valores de absorbância foram determinados por espectrofotometria a 595 nm. A capacidade antioxidante das amostras foi determinada com base em curva de calibração, traçada usando $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0-2000 $\mu\text{mol/L}$). Os resultados foram expressos em μmol de sulfato ferroso equivalente. g^{-1} , em base seca.

2.5.3.6 Cinética de degradação

A constante de degradação (k) foi determinada usando um modelo cinético de primeira ordem de acordo com a Equação (4), e a meia-vida das antocianinas incorporadas na bebida láctea, foi determinada de acordo com a Equação (5), como sugere Righi da Rosa et al. (2019).

$$C = C_0 e^{-k t} \quad (\text{Eq.4})$$

Onde: C = concentração de antocianinas no tempo t ($\text{mg}/100 \text{g}^{-1}$); C_0 = concentração inicial de antocianinas ($\text{mg}/100 \text{g}^{-1}$); t = tempo de armazenamento (dias).

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde: $t_{1/2}$ = tempo de meia-vida em dias; k = constante de degradação; t = tempo em dias.

2.6 Bioacessibilidade *in vitro* do sistema-modelo de bebida láctea

As formulações, descritas no item 2.4, foram submetidas aos ensaios de digestão *in vitro*, contemplando as seguintes etapas: oral, gástrica e intestinal,

realizadas em triplicata. O protocolo de Brodkorb et al. (2019) e Minekus et al. (2014) foi utilizado como referência no estudo.

Para a fase oral, 5 mL da amostra de bebida láctea foi misturada a 5 mL de solução salivar (água ultrapura e 75 U/mL de alfa-amilase), obtendo a proporção final de 50:50 (v/v) para alimentos líquidos, como sugere o protocolo. Ajustou-se o pH para 7, e as amostras foram mantidas sob agitação durante 2 minutos a 37 °C (tempo e temperatura recomendados para contato com a enzima).

Na fase gástrica foram utilizados 10 mL da fase salivar a qual foi misturada com 10 mL de solução gástrica (pepsina suína 2000 U/mL e água ultrapura), o pH foi ajustado para 3, e a digestão realizada em 2 horas a 37°C, sob agitação.

No ensaio intestinal, 20 mL da fase gástrica foi misturada em 20 mL de solução intestinal (tripsina suína 100 U/mL, 10 mM de sais biliares e água pura), o pH foi então reajustado para 7, seguindo para a digestão sob agitação, durante 2 horas a 37°C. Os valores de pH de todas as fases foram ajustados com NaOH e HCl, ambos 1 M e a agitação realizada no equipamento BOD (SP, Labor) a 110 rpm.

Para interromper a hidrólise, as amostras foram mergulhadas em banho de gelo por 10 min e o pH ajustado para 2,0, com HCL 1 M, com o objetivo de manter a estabilidade dos polifenóis. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 5400 g a 4 °C por 60 min para separar as frações bioacessíveis e residuais (Kosińska-Cagnazzo et al., 2015; Tagliazucchi et al., 2010). Os teores brutos de antocianinas e fenólicos totais, de ambas as frações coletadas, foram determinados de acordo com os itens 2.5.3.1 e 2.5.3.2 respectivamente.

2.7 Resposta glicêmica do sistema-modelo de bebida láctea

O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), campus Alegre sob o parecer nº 5.458.305. O consentimento foi obtido de cada voluntário da pesquisa, através da assinatura do termo de consentimento livre esclarecido (TCLE).

2.7.1 Tamanho da amostra

A metodologia de referência utilizada foi proposta por Dos Reis Gallo et al. (2021), o tamanho amostral obtido através do cálculo para a estimativa de amostra

para o ensaio clínico proposto por Röhrig et al. (2010), baseado em estudo anterior de resposta pós-prandial que relatou uma mudança significativa na AUC para glicose plasmática com um poder de estudo de 80% e alfa de 0,05, após a ingestão dos polifenóis do fruto pertencente às Myrtaceas, assim como a jabuticaba (Balisteiro et al., 2013). O tamanho da amostra de 9 sujeitos foi calculado com nível de confiança de 95% ($\alpha = 2,5\%$) e poder de 90%. Considerando a desistência de 30%, o tamanho da amostra final foi aumentado para 12 voluntários.

2.7.2 Critérios de seleção e orientação dos indivíduos

Foram recrutados indivíduos com idade entre 20-31 anos, que não fizessem uso de medicamentos que afetassem a glicemia; IMC 18,9 – 24,9; com flutuação de peso corporal ≤ 5 kg nos últimos três meses; que não fossem tabagistas; que não apresentassem reações alérgicas aos ingredientes das formulações; que não relatassem doenças cardiovasculares, gastrointestinais e metabólicas (diabetes, hipotireoidismo e hipertireoidismo); e que tivessem glicemia capilar em jejum 70-100 mg/dL. Na triagem, os participantes responderam aos questionários com base nos critérios de recrutamento. Todos os indivíduos completaram o estudo. O estudo foi caracterizado como um ensaio clínico, em que cada voluntário fez o consumo de cada uma das bebidas formuladas, respeitando um intervalo de 3 a 7 dias entre as sessões experimentais. Os indivíduos foram orientados a não consumirem álcool e a não praticarem atividades físicas intensas 24 horas antes dos testes, além de evitarem alimentos e bebidas ricas em polifenóis (chocolate, vinho, frutas vermelhas, café e chá), no mesmo período (Balisteiro et al., 2013).

2.7.3 Resposta glicêmica das formulações

No total, 4 formulações de bebidas lácteas, a saber: bebida láctea sem adição de extrato concentrado de jabuticaba e pós microencapsulados (controle BLC); bebida láctea com a adição do extrato concentrado de jabuticaba (EJB); bebida láctea com a adição dos pós microencapsulados de maltodextrina (PMD) e goma arábica (PGA). Todas as formulações de bebidas lácteas foram produzidas como descrito no item 2.4, no dia antecedente a ingestão e coleta da glicemia dos voluntários. As bebidas foram envasadas em frasco de polietileno de 200 mL e mantidas sob

refrigeração (4 ± 1 °C). Cada formulação continha 25 g de carboidrato disponível (FAO, 1998).

Após o jejum de 12 horas, foi oferecido a cada participante 200 mL da formulação teste estabelecida para o dia. O tempo para ingestão da bebida foi de 10 minutos. Nos tempos zero (imediatamente antes do consumo da bebida teste), 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos, contados imediatamente após o consumo da bebida teste, foram avaliadas as alterações glicêmicas resultantes do consumo das bebidas lácteas, por meio da determinação da glicemia capilar, usando-se um glicosímetro digital (Accu-check Performa) (Dos Reis Gallo et al., 2021). Durante o período de teste, os participantes não consumiram nenhum tipo de alimento ou bebida, exceto água. Os voluntários permaneceram no laboratório, executando atividades leves, como leitura, uso de computadores ou celulares, assistindo televisão ou ouvindo música.

2.8 Análises estatísticas

O experimento seguiu o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro tratamentos (PMD, PGA, EJB e BLC), em triplicata. No estudo da estabilidade físico-química da bebida láctea, modelos matemáticos foram ajustados a partir de análises de regressão, e a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey foram utilizados para a comparação entre médias dos 4 tratamentos, com nível de significância de 5%, através do programa SigmaPlot 11.0 (Systat Software, Inc). Os gráficos foram elaborados através do software GraphPad PRISM® (versão 9.0.2).

No estudo da bioacessibilidade, foi empregado teste de Tukey a 5% de significância para comparação das médias dos tratamentos. No estudo da resposta glicêmica, a área incremental sob a curva (iAUC) para glicose pós-prandial, foi calculada usando a regra trapezoidal integrada de áreas de contagem acima e abaixo da concentração basal em jejum, subtraindo pelo valor basal de glicemia. O teste de Tukey a 5% de significância foi utilizado para confirmar as diferenças significativas nos resultados de iAUC, através do software GraphPad PRISM® (versão 9.0.2).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As bebidas lácteas, logo após a incorporação do extrato concentrado (EJB) e pós microencapsulados de maltodextrina e goma arábica (PMD e PGA), foram avaliadas quanto a sua estabilidade no pH, acidez total titulável e cor, além do estudo

da degradação e atividade antioxidante dos compostos bioativos incorporados no sistema alimentar, ao longo de 28 dias de armazenamento. Foram ajustados os modelos matemáticos que melhor se aplicavam a cada variável analisada, avaliando o comportamento e interação dos compostos bioativos com a matriz onde foram incorporados.

3.1 pH e acidez

Logo após a incorporação do extrato concentrado e pós microencapsulados (tempo zero), foram observadas mudanças nos valores de pH e acidez da bebida, (Tabela 1). De acordo com a ANOVA, o fator tempo não foi significativo para a variável pH e acidez, ao longo do armazenamento, em todas as formulações, mas o fator tratamento foi significativo ($p < 0,05$). Diante disso, optou-se pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, o qual demonstrou que, a menor média de pH foi registrada para o tratamento PGA ($p < 0,05$). Todos os tratamentos diferenciaram-se estatisticamente entre si ($p < 0,05$).

Tabela 1: pH e acidez das bebidas lácteas ao longo de 28 dias de armazenamento

Tratamento	pH	Acidez
PMD	4,26 ± 0,02 ^b	0,70 ± 0,00 ^c
PGA	3,91 ± 0,02 ^a	1,33 ± 0,02 ^d
EJB	4,34 ± 0,05 ^c	0,62 ± 0,01 ^b
BLC	4,42 ± 0,05 ^d	0,58 ± 0,01 ^a

*Valores expressos como média ± desvio padrão (n=3). Médias seguidas por uma mesma letra, em uma mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BLC (bebida láctea controle); PMD (bebida incorporada com microencapsulados de maltodextrina; PGA (bebida incorporada com microencapsulados de goma arábica e EJB (bebida incorporada de extrato)*g ácido láctico/100g amostra.

Em relação à acidez total titulável, foi constatado que as médias, considerando os 28 dias de armazenamento, de todos os tratamentos se diferenciaram ($p < 0,05$). Os maiores valores médios de acidez, foram verificados para PGA, seguidos por PMD, EJB e BLC respectivamente.

As diminuições nos valores de pH e aumento da acidez da bebida, especialmente para os tratamentos PGA e PMD, devem-se principalmente ao caráter ácido dos pós produzidos. A acidez mais elevada dos microencapsulados, está relacionada a extração dos próprios ácidos orgânicos da casca da jabuticaba e a

etapa de acidificação com ácido cítrico, até pH 3, das soluções antes da secagem por pulverização (descrita no item 2.3), que teve o intuito de preservar a estabilidade dos polifenóis. Lima et al. (2019), também observaram a mudança desses parâmetros com a incorporação de 6% de antocianinas microencapsuladas produzidos da polpa de juçara (*Euterpe edulis*). Os autores atribuíram a diminuição do pH à acidez natural da fruta utilizada, à base láctea e à etapa de acidificação para elaboração de extratos etanólicos do fruto.

3.2 Colorimetria

É descrito que a cor tem grande influência e é decisiva para os consumidores na compra de alimentos, sendo que, geralmente este aspecto se sobrepõe aos demais atributos do produto (Zorenc et al., 2017). Ao longo do armazenamento, as antocianinas podem sofrer um processo de degradação provocando modificações nos parâmetros colorimétricos, como saturação e mudanças na tonalidade, podendo modificar a aparência do produto (Borges et al., 2022).

Na bebida láctea, logo após a incorporação do extrato concentrado de jabuticaba (EJB), dos microencapsulados de maltodextrina (PMD) e dos microencapsulados de goma arábica (PGA), foram observados diferentes parâmetros colorimétricos para os tratamentos, como pode ser observado na Fig. 2.

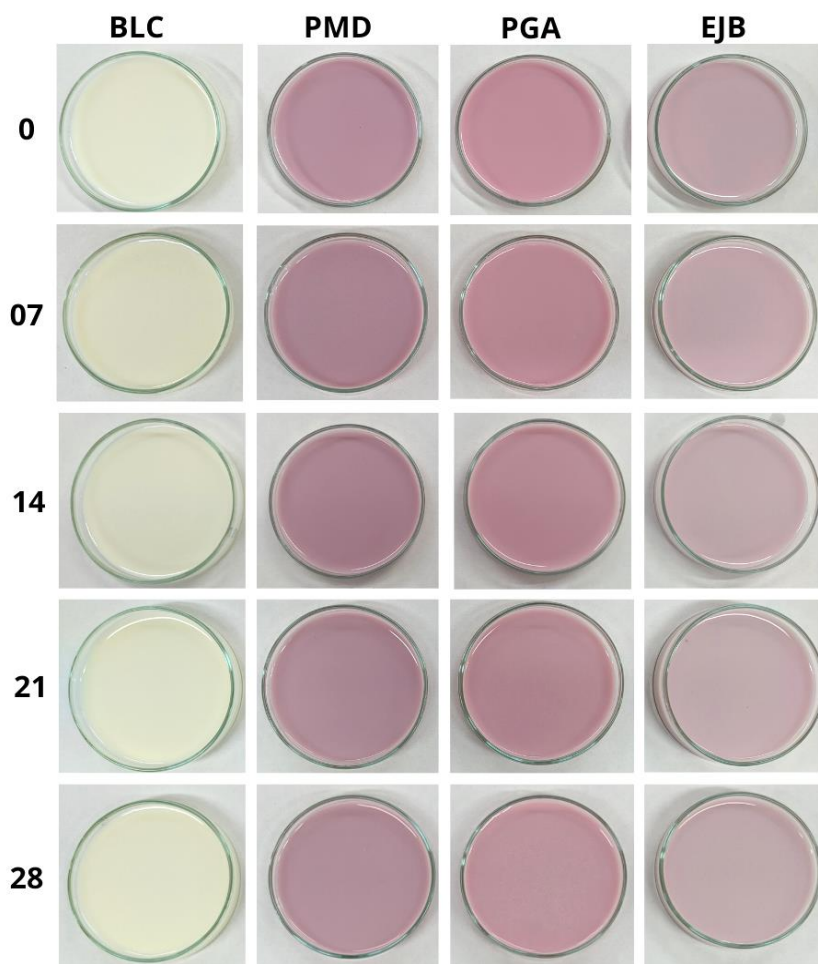


Fig. 2: Fotografias das bebidas lácteas incorporadas de extrato concentrado de jabuticaba (EJB), dos microencapsulados de maltodextrina (PMD) e dos microencapsulados de goma arábica (PGA), e da bebida láctea controle (BLC) ao longo de 28 dias de armazenamento.

A bebida láctea controle (BLC) apresentou valores de L^* em torno de 90,41, entretanto, com a adição dos microencapsulados e do extrato concentrado, houve redução da luminosidade de todas as amostras, enquanto foi observado que, o parâmetro a^* aumentou significativamente ($p < 0,05$) após as incorporações. As alterações iniciais da coloração da bebida, deve-se ao aspecto de cor dos pós microencapsulados e do extrato incorporado, elevando principalmente a característica avermelhada das amostras. Este aspecto de cor é característico dos polifenóis extraídos da jabuticaba, principalmente das antocianinas presentes no extrato. A ANOVA demonstrou que a variável tempo não foi significativa, logo, os valores de L^* de todos os tratamentos, puderam ser considerados estáveis ao longo

dos 28 dias de armazenamento (Fig. 3A). Pelo teste Tukey, todos os tratamentos se diferenciaram ($p < 0,05$) entre si, sendo os menores valores de L^* , obtidos para PMD e PGA, respectivamente, indicando que os microencapsulados e o extrato (EJB) reduziram ($p < 0,05$), a luminosidade da bebida láctea.

Os valores obtidos para o aspecto de cor do parâmetro a^* , são considerados os mais relevantes para o estudo, relacionado principalmente com a presença das antocianinas, contribuindo para os tons mais avermelhados na bebida láctea. Através do Tukey, foi verificada diferenças significativas ($p < 0,05$) entre todos os tratamentos. Sendo que, PGA obteve os maiores valores a^* , seguidos por PMD e EJB respectivamente. Os valores de a^* , mais elevados para PGA, podem estar relacionados ao seu menor pH, sendo que, em meios ácidos, há uma maior conservação de estabilidade das antocianinas e a predominância do cátion *flavílium* (Giusti & Wrolstad, 2003). Na BLC, não foram quantificadas antocianinas totais. A bebida láctea controle (BLC) obteve valores negativos do parâmetro a^* ($-3,48 \pm 0,13$), como era esperado, já que nessa formulação não houve qualquer incorporação após sua formulação. Na análise de regressão do parâmetro a^* , o modelo matemático de decaimento exponencial, mostrou-se significativo ($p < 0,05$) para todos os tratamentos ao longo do tempo, exceto o BLC o qual foi não significativo, sendo as equações obtidas para PMD ($\hat{y} = 11,8512 + 2,1351e^{-0,0849t}$, $R^2 = 0,98$), PGA ($\hat{y} = 15,6555 + 3,4662e^{-0,0720t}$, $R^2 = 0,99$) e EJB ($\hat{y} = 7,7867 + 1,4212e^{-0,0886t}$, $R^2 = 0,99$). O decaimento exponencial mostrou a queda dos valores de a^* (Fig. 3B), sendo estas, maiores nos primeiros dias de armazenamento (0, 7 e 14 dias), como pode ser observado na Fig. 3B.

O mesmo comportamento relacionado à diminuição dos valores de a^* , foi encontrado para iogurte incorporado com extrato de jabuticaba em diferentes concentrações, ao longo de 28 dias de armazenamento, atribuído à degradação das antocianinas (Pinto et al., 2023). Estes resultados estão relacionados àqueles encontrados para as antocianinas na bebida láctea (Fig. 4B), em que foi possível observar a degradação desses compostos, ao longo do armazenamento, podendo assim, interferir diretamente no parâmetro de cor a^* . Uma correlação positiva entre a redução do parâmetro a^* e a degradação das antocianinas ao longo de 28 dias foi obtida para este estudo, sendo para PMD ($R^2 = 0,94$), PGA ($R^2 = 0,85$) e EJB ($R^2 = 0,98$).

Observou-se que as bebidas EJB e PMD apresentaram aumento na

coordenada b^* ($p < 0,05$) ao longo do armazenamento (Fig. 3C). O modelo de crescimento exponencial foi utilizado para explicar este comportamento. As equações obtidas para PMD ($\hat{y} = 1,0861 + 1,7805(1 - e^{0,0633 t})$, $R^2 = 0,97$) e EJB ($\hat{y} = 2,6574 + 1,3847(1 - e^{0,0620 t})$, $R^2 = 0,99$), demonstram que, o aspecto de cor amarelado das amostras, aumentaram no início, e permaneceram constantes ao final do armazenamento. Para PGA, a regressão linear foi a que melhor se ajustou, sendo que a equação ($\hat{y} = 2,5200 + 0,0377 t$, $R^2 = 0,94$) demonstrou o aumento da magnitude do parâmetro b^* , ao longo do tempo. Para BLC, a ANOVA demonstrou que a variável tempo não foi significativa, logo, os valores de b^* , podem ser considerados estáveis ao longo dos 28 dias de armazenamento. Além disso, verificou-se, todas as bebidas se diferenciaram entre si, para o parâmetro b^* ($p < 0,05$).

A cromaticidade (C^*) está ligada à expressão quantitativa ou “quantidade de cor”, o parâmetro permite avaliar a sensação visual da amostra estudada (Pinto et al., 2023). No presente estudo, todos os tratamentos foram significativamente diferentes ($p < 0,05$). Os maiores valores de C^* foram encontrados para PGA, seguidos por PMD, BLC e EJB, respectivamente. A análise de regressão (Fig. 3D) de todos os tratamentos ao longo do armazenamento, demonstrou um decaimento significativo ($p < 0,05$) da cromaticidade, para PGA, PMD e EJB, até 14 dias de armazenamento. Após, a cromaticidade permaneceu constante até o tempo de 28 dias. A diminuição de C^* , assim como foi observado para o parâmetro a^* , relaciona-se principalmente a degradação das antocianinas (Pinto et al., 2023). As equações obtidas foram, para PMD ($\hat{y} = 12,1908 + 1,8401 e^{-0,0945 t}$, $R^2 = 0,99$); PGA ($\hat{y} = 16,1673 + 3,1382 e^{-0,0797 t}$, $R^2 = 0,99$) e EJB ($\hat{y} = 8,7355 + 0,8481 e^{-0,1167 t}$, $R^2 = 0,99$). Para BLC, a ANOVA, demonstrou que a variável tempo não foi significativa, logo, os valores de C^* , podem ser considerados estáveis ao longo dos 28 dias de armazenamento.

O ângulo de tonalidade cromática (h°), situa-se na faixa entre o vermelho e o amarelo (0° a 90°), neste caso, quanto mais próximo a 0° mais amostra se aproxima da coloração vermelha, característica de extratos e pós ricos em antocianinas. Os valores de h° para PMD e PGA não diferiram estatisticamente ($p > 0,05$). Porém, as bebidas incorporadas apenas de EJB, apresentaram valores significativamente ($p < 0,05$) maiores, quando comparadas às bebidas incorporadas das microcápsulas, indicando uma tonalidade mais amarelada. Quanto a bebida PMD e PGA, os tons amarelados podem associar-se a influência dos agentes carreadores, podendo estes

contribuir para as características mais amareladas da bebida, afastando o ângulo da região vermelha (0°), e aproximando-o cada vez mais da coloração amarela (90°). Neste caso, a tonalidade das bebidas incorporadas das microcapsulas, apresentaram tonalidades mais avermelhas que a bebida incorporada de extrato, indicando uma maior presença das antocianinas. Através do modelo de crescimento exponencial, foi possível observar que o ângulo de tonalidade cromática, aumentou significativamente ($p < 0,05$) para as bebidas adicionadas de extrato ou microcápsulas (Fig. 3E). As equações obtidas foram, para PMD ($\hat{y} = 4,4633 + 9,7724 (1 - e^{-0,0538 t})$, $R^2 = 0,97$), PGA ($\hat{y} = 7,5112 + 20,6663 (1 - e^{0,0099 t})$, $R^2 = 0,97$) e EJB ($\hat{y} = 16,0893 + 11,5570 (1 - e^{0,0632 t})$, $R^2 = 0,99$). Para BLC, os maiores ângulos de tonalidade foram obtidos, sendo esta característica, atribuída a própria base láctea e sua composição, elevando os tons amarelados da bebida. A ANOVA, demonstrou que a variável tempo não foi significativa para BLC, logo, os valores de h° podem ser considerados estáveis ao longo dos 28 dias de armazenamento.

Na variação global de cor (ΔE) os valores foram obtidos comparando as amostras do tempo zero com 28 dias, com o objetivo de avaliar se o armazenamento influenciou de maneira global, nos aspectos de cor do produto, em comparação com o primeiro dia de incorporação dos microencapsulados e do extrato concentrado. Todos os tratamentos diferiram estatisticamente ($p < 0,05$) entre si, sendo que, os maiores valores de ΔE , foram encontrados para PGA ($3,58 \pm 0,04$), seguidos por PMD ($2,80 \pm 0,03$) e EJB ($1,93 \pm 0,01$), respectivamente. Segundo Obón et al. (2009), para o ΔE situado entre 1,5 e 5 (o limiar de discriminação visual), a diferença de cor já pode ser distinguida, mas só se torna evidente, para valores acima de 5.

No presente estudo, os valores de ΔE das bebidas lácteas incorporados de microencapsulados e extrato concentrado, ficaram abaixo da faixa considerada evidente. Assim, é possível observar que, de maneira global, mesmo com o decaimento significativo dos parâmetros a^* e C^* , e o aumento de b^* e h° , a cor das bebidas permaneceu com as características colorimétricas desejadas até o final do tempo de armazenamento.

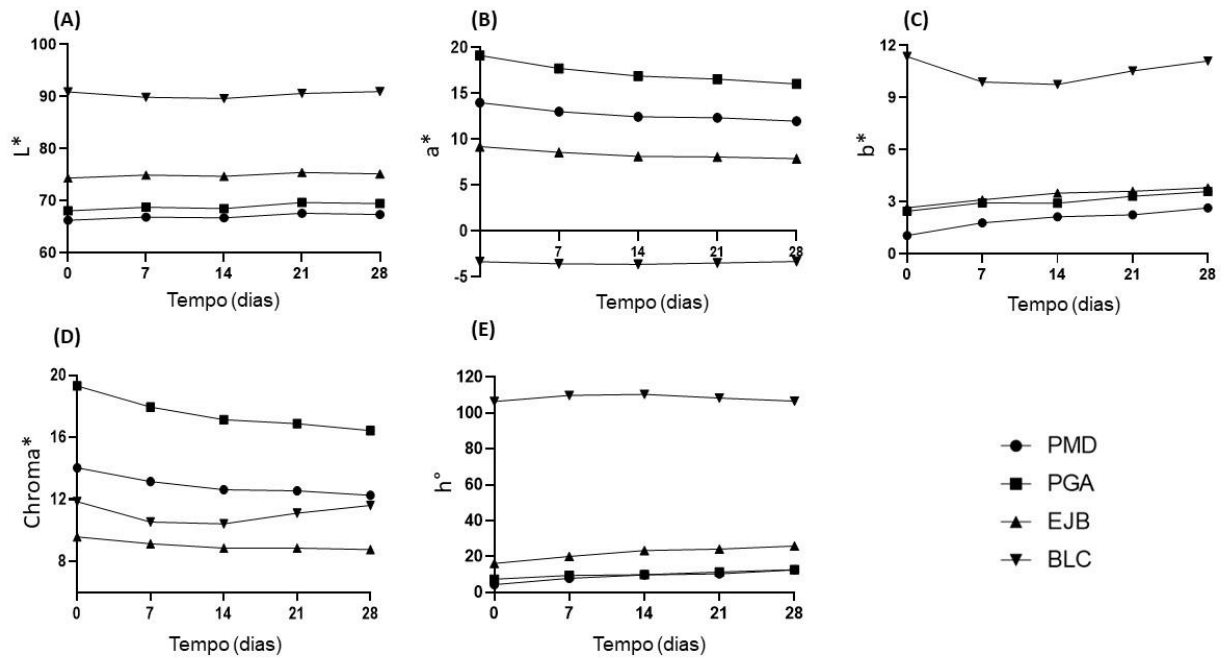


Fig. 3: Colorimetria da bebida láctea ao longo de 28 dias de armazenamento. BLC (bebida láctea controle); PMD (bebida incorporada com microencapsulados de maltodextrina; PGA (bebida incorporada com microencapsulados de goma arábica e EJB (bebida incorporada de extrato). L*: luminosidade; a* intensidade de vermelho (+) e verde (-); b*: intensidade de amarelo (+) e azul (+); h°: ângulo de tonalidade cromática; C*: Chroma;

3.3 Estabilidade dos compostos bioativos

O conteúdo de fenólicos totais (CFT) das formulações de bebida láctea foi avaliado ao longo de 28 dias de armazenamento (Fig. 4A), com o objetivo de verificar sua estabilidade e seu comportamento após a incorporação na matriz alimentar. Foi observado que, a variável tempo não foi significativa, logo, o CFT podem ser considerados estáveis ao longo dos 28 dias de armazenamento. Todas as formulações se diferenciaram estatisticamente ($p < 0,05$), sendo que, PMD apresentou o maior conteúdo de fenólicos totais, seguidos por EJB, PGA e BLC, respectivamente. Mesmo sem incorporação do extrato concentrado ou pós microencapsulados, foi observado na BLC uma fração considerável de fenólicos. Este fato pode ter ocorrido devido à presença de interferentes que reagiram com o reagente de Folin-Ciocalteu nas formulações (Rocha et al., 2019). Entre os fatores limitantes desse método, destaca-se, a capacidade que o reagente Folin-Ciocalteu tem de reagir com todas as substâncias redutoras presentes, como proteínas, aminoácidos e açúcares (frutose e glicose), que são contabilizados como fenóis totais podendo levar a uma superestimação dos resultados obtidos (Naczki & Shahidi, 2004; Rover & Brown, 2013).

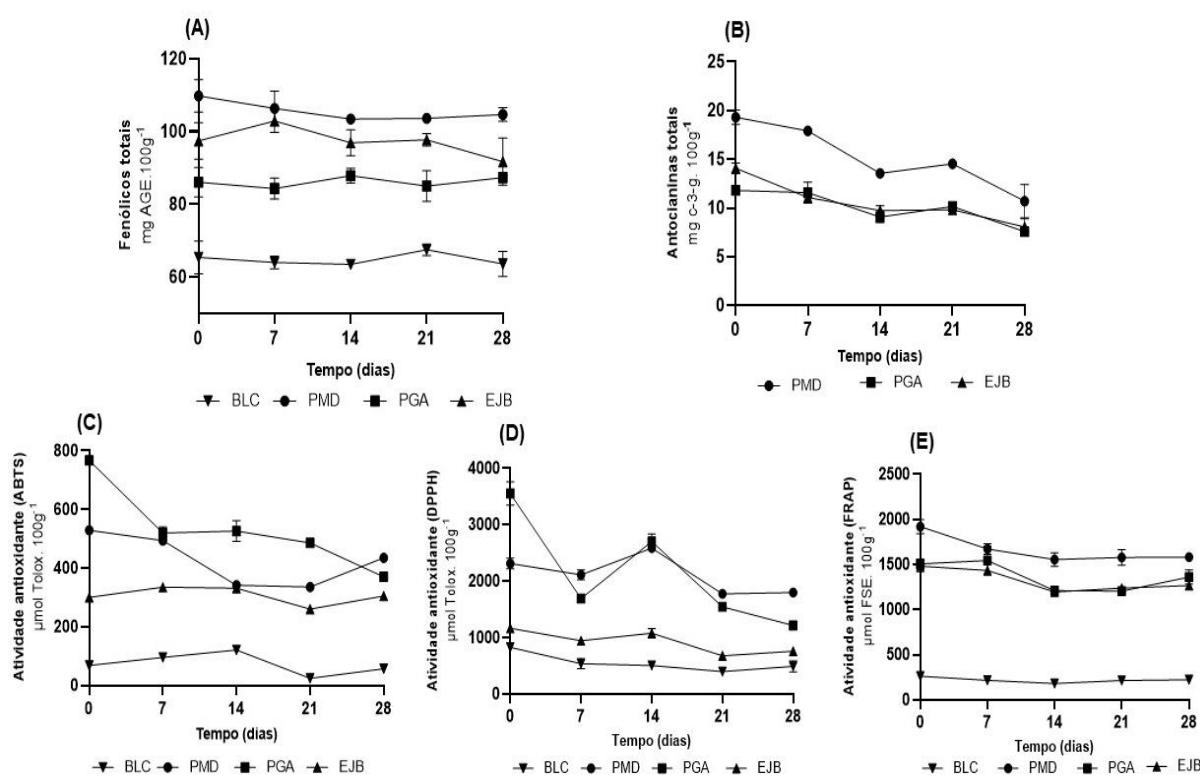


Fig. 4: Conteúdo fenólico total (A) e antocianinas totais (B); atividade antioxidante ABTS (C), DPPH (D) e FRAP (E) das bebidas lácteas ao longo de 28 dias de armazenamento. BLC (bebida láctea controle); PMD (bebida incorporada com microencapsulados de maltodextrina; PGA (bebida incorporada com microencapsulados de goma arábica e EJB (bebida incorporada de extrato). Os resultados são expressos como média \pm desvio padrão (n=3). AGE: Ácido gálico equivalente; FSE: Sulfato ferroso equivalente. ABTS: capacidade de eliminação do cátion ABTS, DPPH: capacidade de eliminação do radical DPPH, FRAP: poder antioxidante de redução do ferro.

A incorporação de polifenóis em matrizes alimentares pode agregar funcionalidade ao produto, porém, em matrizes complexas, a adição destes compostos resulta em uma série de interações com distintos constituintes. Em produtos lácteos, ricos em proteínas, como a bebida láctea, essas interações demonstram uma maior relevância, devido a elevada afinidade polifenóis-proteínas, podendo afetar principalmente, a biodisponibilidade desses compostos (Anders Bennick, 2016; S. Silva et al., 2018).

Quanto às antocianinas totais (AT), observou-se que estas foram degradadas ao longo do tempo de armazenamento para todos os tratamentos, entretanto, PMD

se destacou por apresentar um conteúdo de AT significativamente ($p < 0,05$) maior que PGA e EJB, até o último dia de armazenamento. Pela análise de regressão, equações de decaimento exponencial foram significativas ($p < 0,05$) para todos os tratamentos, como apresentado na Tabela 4. Comparando-se apenas entre as bebidas incorporadas dos pós microencapsulados (PMD e PGA), pode-se observar uma maior concentração de antocianinas para a microencapsulação utilizando o agente carreador maltodextrina, sendo o mesmo observado para o conteúdo de fenólicos totais.

As bebidas incorporadas de PGA e EJB, não se diferiram estatisticamente ($p > 0,05$), podendo o conteúdo de AT entre os dois tratamentos, serem considerados iguais ao longo de 28 dias. A Fig. 4B, demonstra o comportamento do conteúdo de antocianinas totais analisados durante todo o período de armazenamento da bebida.

Em estudo semelhante, sobre a incorporação de antocianinas do extrato seco, extraído da casca da jabuticaba (*Myrciaria cauliflora* Mart.) em sistema alimentar de iogurte, os autores também observaram a degradação do conteúdo de antocianinas do produto ao longo de 28 dias de armazenamento refrigerado, levando alterações da cor na bebida (Pinto et al., 2023).

Os modelos matemáticos de primeira ordem foram ajustados com o intuito de estudar a constante de degradação (k) e o tempo de meia vida ($t_{1/2}$) das antocianinas incorporadas na bebida láctea, ao longo de 28 dias de armazenamento, como descrita na Tabela 4.

Tabela 4: Constante de degradação e tempos de meia vida das antocianinas incorporadas na bebida láctea durante 28 dias de armazenamento

Tratamento	Modelo ajustado	(k)	R ²	Meia-vida (dias)
PMD	$y = 19,3982 e^{-0,01746 t}$	0,0174	0,88	39,68
PGA	$y = 12,1030 e^{-0,0139t}$	0,0139	0,77	49,86
EJB	$y = 13,4780 e^{-0,0186t}$	0,0186	0,90	37,26

A meia-vida foi utilizada para estimar o tempo que as antocianinas microencapsuladas ou do extrato, incorporados na bebida, levariam para atingir 50% de sua concentração inicial. Como era esperado, a meia-vida mais longa foi observada para PGA (49,86 dias) e PMD (39,68 dias), quando comparado a EJB

(37,26 dias). Esses resultados demonstram que a microencapsulação das antocianinas aumentou a vida de prateleira desses compostos sensíveis, em comparação ao extrato. Ścibisz et al. (2012) encontraram resultados semelhantes para o iogurte enriquecido de antocianinas do mirtilo. Segundo os autores, a meia-vida desses compostos chegaram a valores próximos a 40 dias. Vale ressaltar que geralmente produtos lácteos como bebidas lácteas ou iogurte, apresentam validade comercial de 25 a 35 dias (Wallace & Giusti, 2008), indicando que, mesmo com a degradação desses pigmentos, boa parte da concentração inicial das antocianinas prevalecem no produto, durante sua vida de prateleira.

A incorporação dos pós microencapsulados (PMD e PGA) e extrato concentrado (EJB), aumentou significativamente ($p > 0,05$) a capacidade antioxidante das bebidas quando comparadas a bebida controle (BLC) nos diferentes ensaios (ABTS, DPPH e FRAP), pelo teste de Tukey, como apresentado na Fig. 4. Para os ensaios ABTS e DPPH (Fig. 4C e 4D, respectivamente) os tratamentos PGA e PMD, demonstraram as maiores capacidades antioxidantes ($p < 0,05$), quando comparado ao EJB, ao longo do armazenamento, indicando que a microencapsulação promoveu uma maior retenção dos compostos antioxidantes.

Pela ANOVA, a variável tempo não foi significativa, em nenhum dos tratamentos, logo, a capacidade antioxidante (ABTS), da bebida láctea, pode ser considerada estável ao longo dos 28 dias de armazenamento.

A capacidade antioxidante medida pela eliminação do radical DPPH, foi maior ($p < 0,05$) para as bebidas incorporadas das microcápsulas (PMD e PGA), consideradas estatisticamente ($p > 0,05$) iguais. Enquanto a menor capacidade antioxidante foi obtida para EJB e a amostra controle (BLC), iguais estatisticamente ($p > 0,05$), ao longo de 28 dias de armazenamento. Além disso, verificou-se que, a variável tempo não foi significativa, em nenhum dos tratamentos, logo, a capacidade antioxidante (DPPH), da bebida láctea, pode ser considerada estável ao longo dos 28 dias de armazenamento.

O poder antioxidante de redução férrica (FRAP), demonstra que o tratamento PMD obteve a maior capacidade antioxidante ($p < 0,05$) entre as demais (Fig. 4E). Para PGA e EJB, não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$) pelo teste Tukey. A capacidade antioxidante de ambos os tratamentos, foram estatisticamente maiores ($p < 0,05$) comparados a amostra controle (BLC), da qual não houve a incorporação dos polifenóis. A análise de regressão demonstrou através do modelo de

decaimento exponencial que o tratamento PMD obteve uma diminuição significativa ($p < 0,05$) do potencial antioxidante ($\hat{y} = 1566,0671 + 355,8080e^{-0,1943}$; $R^2 0,98$). Pela ANOVA, a variável tempo não foi significativa, nos tratamentos PGA, EJB e BLC, logo, a capacidade antioxidante (FRAP), pode ser considerada estável ao longo dos 28 dias de armazenamento para esses três tratamentos.

Em todos os ensaios, foi verificada, mesmo que significativamente menor ($p < 0,05$), certa atividade antioxidante para a BLC, podendo estar relacionado, principalmente aos compostos redutores presentes na própria base láctea como, os aminoácidos contendo enxofre, além do fosfato, vitaminas A e E, carotenóides, selênio, zinco, sistemas enzimáticos e oligossacarídeos do leite. A própria fermentação da bebida láctea pode ter contribuído para a presença de antioxidantes na matriz, relacionando-se a formação de peptídeos bioativos durante o processo (Khan et al., 2019). Em todos os casos, ainda assim o potencial antioxidante dos produtos lácteos ainda é baixo, necessitando da incorporação dos compostos bioativos, como foi realizado neste estudo. Outros estudos demonstraram que a incorporação de polifenóis em lácteos aumentou significativamente ($p < 0,05$) o potencial antioxidante dos produtos. Como o iogurte suplementado com bagaço de amora (Du et al., 2022), concentrado de cenoura preta (Pandey et al., 2021), pó de chá verde (Jeong et al., 2018) e sementes de jabuticaba (Fidelis et al., 2021) e em bebida láctea, com a incorporação da polpa de juçara microencapsulada por spray drying (Lima, Madalão, dos Santos, et al., 2019). Desta forma, foi possível observar uma contribuição positiva com a incorporação dos polifenóis da jabuticaba na bebida láctea, ou seja, um aumento significativo ($p < 0,05$) do potencial antioxidante e certa estabilidade ao longo do armazenamento.

3.4 Bioacessibilidade dos compostos bioativos na bebida

Após a simulação gastrointestinal *in vitro* (SGI) em todas as formulações, foi verificado um aumento significativo ($p < 0,05$) no conteúdo de fenólicos totais e antocianinas da bebida láctea em comparação com as quantidades iniciais encontradas na bebida após sua formulação e incorporação dos pós e extrato concentrado (tempo zero).

Na Fig. 5A, referente aos compostos fenólicos, antes e após a digestão, é possível observar a magnitude desse aumento, baseando-se nos valores brutos dos compostos ao final da simulação. Foram verificadas diferenças significativas ($p < 0,05$),

entre os tratamentos antes da digestão gastrointestinal, sendo que, somente PGA e EJB não se diferiram ($p > 0,05$). O maior conteúdo inicial de CFT, foi atribuído ao tratamento PMD, e o menor conteúdo, a BLC.

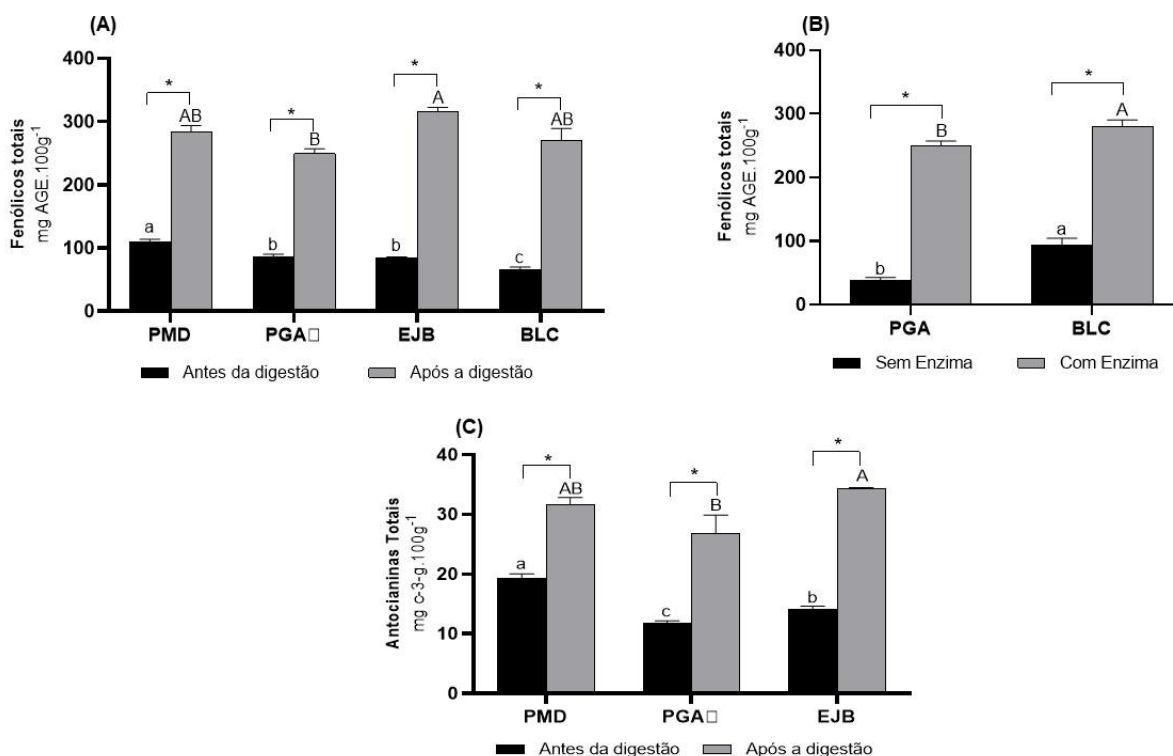


Fig. 5: Bioacessibilidade dos compostos fenólicos totais antes e depois da simulação gastrointestinal na bebida láctea no tempo zero.

Dados expressos em média \pm desvio padrão. Médias seguidas por uma mesma letra minúscula para análise de CFT, antes da digestão, não se diferem entre si a ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey, e médias seguidas por uma mesma letra maiúscula para análise de CFT após a digestão, não diferem entre si ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey. Médias seguidas por uma mesma letra minúscula para a digestão sem a enzima, para CFT, não diferem entre si ($p > 0,05$) pelo teste Tukey. Já médias seguidas pela mesma letra maiúscula na digestão com enzimas, para o CFT não se diferem entre si ($p > 0,05$). Médias seguidas por uma mesma letra minúscula para análise de AT antes da digestão, não diferem entre si a ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey, e médias seguidas por uma mesma letra maiúscula para análise depois da digestão para AT não diferem entre si a ($p > 0,05$) pelo teste de Tukey. * Significativo ($p < 0,05$) pelo teste Tukey. PMD: bebida láctea incorporada de pós microencapsulados com maltodextrina; PGA: bebida láctea incorporada de pós microencapsulados com goma arábica; EJB: bebida láctea incorporada de extrato concentrado de jabuticaba; BLC: Bebida láctea controle, sem incorporação de polifenóis.

Após a digestão, verificou-se que houve diferenças significativas ($p < 0,05$) apenas para PGA e EJB, sendo que, neste caso, a bebida incorporada do extrato concentrado (EJB), em comparação a PGA, apresentou o maior conteúdo de fenólicos totais. A BLC, mesmo ausente de qualquer incorporação de compostos fenólicos relacionados à jabuticaba, apresentou quantidades significativas ($p < 0,05$) desses compostos, antes e após a digestão. Como já discutido, o método de quantificação com o reagente de Folin-Ciocalteu apresenta inúmeros interferentes

relativos à matriz alimentar, que podem superestimar os resultados de fenólicos das formulações, principalmente açúcares, aminoácidos ou substâncias redutoras presentes no alimento (Rocha et al., 2019; Rover & Brown, 2013).

Para a BLC, após a digestão, o CFT foi estatisticamente igual as demais formulações ($p > 0,05$). Os resultados demonstram que, a quantidade de fenólicos incorporados nas bebidas lácteas (PMD, PGA e EJB) podem não ter contribuído para um aumento significativo do seu conteúdo após a digestão, sendo necessário estudar maiores porcentagens de incorporação de bioativos do extrato e pós microencapsulados para o produto elaborado. Mesmo que, PMD apresentou valores de fenólicos significativamente ($p < 0,05$) maiores em seu conteúdo antes da digestão simulada, não foi possível descrever se a microencapsulação promoveu maior proteção e liberação controlada desses compostos após a simulação.

Souza et al., (2021), após simulação da digestão *in vitro* de suco misto de frutas tropicais microencapsuladas, verificaram um aumento tanto no conteúdo de compostos fenólicos, com exceção da quercetina, quanto na atividade antioxidante pelo método ORAC. Segundo os autores, os níveis de ácido gálico aumentaram 109,43% após a simulação da digestão. Dutra et al. (2017) também observaram no estudo da bioacessibilidade de polpas de frutas exóticas brasileiras, o aumento do conteúdo de rutina, ácido gálico, quercetina e ácido *p*-cumárico no umbu-cajá após a digestão intestinal em comparação à fração gástrica. Os autores relataram o aumento de até 127,58% nos teores de ácido *trans*-cinâmico. Tagliazucchi et al. (2010) no estudo da bioacessibilidade dos polifenóis da casca da uva, também observaram aumento desses compostos após duas horas de digestão gástrica, sendo 21,9% para a catequina.

Os rearranjos químicos de alguns compostos, também podem aumentar a bioacessibilidade de alguns ácidos fenólicos, sendo que, em condições ácidas e alcalinas, semelhantes à digestão *in vitro*, pode ocorrer hidrólise das ligações éster dos elagitaninos por exemplo, provocando seu rearranjo estrutural como ácido elágico (Alminger et al., 2014).

Os aumentos aparentes dos compostos fenólicos após a digestão intestinal (Fig. 5A) podem também, estar associados à ação de enzimas intestinais e digestivas, como a pancreatina, que facilitam a liberação de fenólicos ligados à matriz do alimento, isto é, a hidrólise enzimática das proteínas em peptídeos demonstra interromper os complexos de proteína e polifenóis e liberando os polifenóis da matriz

alimentar(Lamothe et al., 2019; Xie et al., 2013). Neste sentido, o trato gastrointestinal pode ser também um dispositivo de extração de compostos fenólicos das matrizes alimentares muito eficiente, disponibilizando-os para absorção no intestino (Tagliazucchi et al., 2010). Assim, com o intuito de avaliar a presença das enzimas digestivas (pepsina e pancreatina) sobre o aumento dos polifenóis após a digestão, as amostras BLC e PGA, foram submetidas a SGI nas mesmas condições anteriormente descritas, entretanto, apenas as enzimas digestivas não foram inoculadas nas amostras. O conteúdo fenólico total encontra-se na Fig. 5B.

Os valores brutos de polifenóis totais encontrados nas amostras BLC e PGA, apresentaram uma diminuição significativa ($p < 0,05$), em comparação com os valores desses compostos, utilizando as enzimas no processo da digestão. Os resultados demonstram que, a presença dessas enzimas afetou significativamente ($p < 0,05$) a quantificação dos polifenóis incorporados em PGA. Como descreveu Xie et al., (2013), a presença das enzimas digestivas recuperou 56% da catequina do chá verde, adicionado ao leite, sugerindo que, houve quebra da associação entre os complexos proteína-catequina. O conteúdo de polifenóis totais encontrados na BLC, mesmo que, neste tratamento, não houvesse qualquer incorporação desses compostos, sugerem uma reatividade do reagente Folin-Ciocalteu à presença de compostos presentes no alimento, diferentes dos polifenóis, como antioxidantes de baixo peso molecular, aminoácidos livres, peptídeos e proteínas, característicos da bebida láctea (Helal & Tagliazucchi, 2018).

A escolha da bebida incorporada com microencapsulados de goma arábica (PGA), para o teste da SGI, com e sem a presença das enzimas digestivas, baseou-se na quantidade superior de proteínas presentes no próprio agente carreador, depois da bebida controle (BLC), já que a própria goma arábica pode apresentar em sua estrutura uma pequena fração de proteína (1,5% - 2,6%) (Gashua et al., 2015). Além disso, já foi relatado que a goma arábica pode interagir principalmente com polifenóis e proteínas, através de pontes de hidrogênio e interações hidrofóbicas (Mateus et al., 2004), podendo dificultar a quantificação desses polifenóis extraídos por métodos químicos.

Mesmo que, os demais tratamentos PMD e EJB, não tenham sido submetidos ao teste da SGI, com e sem a presença das enzimas, é esperado um comportamento semelhante, uma vez que, na PGA e BLC, bebidas com maior teor de proteínas, a ausência das enzimas digestivas diminuíram significativamente ($p < 0,05$) o teor de

CFT quantificados ao final da simulação, sugerindo que, parte desses compostos podem estar associados às proteínas do agente carreador e da matriz alimentar.

Em relação ao teor de antocianinas totais (Fig. 5C), foi observado, assim como em CFT, o aumento significativo ($p < 0,05$) de seu conteúdo ao final da simulação gastrointestinal. As formulações PGA e EJB foram estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). Este aumento no conteúdo de antocianinas ao final da digestão pode estar também atribuído a presença das enzimas digestivas, facilitando a liberação desses compostos da matriz alimentar.

O leite (α -, β - e κ -caseína) e as proteínas do soro (β -lactoglobulina e α -lactalbumina) podem interagir com as antocianinas, essa interação ocorre por meio de grupos hidrofílicos e hidrofóbicos, e essa associação é vantajosa, aumentando a estabilidade das antocianinas. A matriz alimentar pode de forma efetiva, proteger as antocianinas durante o processamento e armazenamento (Arruda et al., 2021). A molécula de antocianina apresenta regiões hidrofílicas, caracterizados por grupos hidroxila, estas formam pontes de hidrogênio com os grupos carbonila e amina das proteínas. Por outro lado, a região hidrofóbica da molécula de antocianinas, pode interagir com as regiões apolares de grupos de aminoácidos, conferindo também, maior estabilidade à antocianina (Khalifa, Li, et al., 2019; Wang et al., 2021).

A interação das antocianinas extraídas da cenoura roxa, com as proteínas do isolado de proteína de soro de leite desnaturado, conferiram maior estabilidade à molécula. O desdobramento da proteína causado pela desnaturação pode ter aumentado as interações com a antocianina, possivelmente devido à maior exposição dos grupos hidrofóbicos (Chung et al., 2015).

É importante ressaltar que, tanto o conteúdo de polifenóis totais e antocianinas, após simulação gastrointestinal, foi quantificado no sobrenadante dos diferentes tratamentos de bebida láctea, sendo assim, apenas polifenóis livres ou ilimitados são determinados (Helal & Tagliazucchi, 2018). Nesse sentido, a metodologia de extração química dos polifenóis da bebida láctea proposta neste estudo, pode não ter sido tão eficiente, mantendo parte desses compostos ligados à matriz alimentar, através das interações proteína-polifenóis. A baixa extração desses compostos na bebida antes da digestão, pode ter contribuído para as diferenças e os aumentos significativos ($p < 0,05$) dos polifenóis após a digestão gastrointestinal. A simulação gastrointestinal, promoveu uma maior extração dos compostos de interesse, sugerindo que o próprio processo de digestão pode ser um aliado para o aumento da bioacessibilidade e

possivelmente da absorção desses compostos pelo intestino (Tagliazucchi et al., 2010).

3.5 Resposta glicêmica das bebidas lácteas fermentadas

Observou-se que, os maiores picos da glicose plasmática ocorreram nos tempos de 15 e 30 minutos, para todas as formulações. Foi observado que PMD obteve o maior pico ($p < 0,05$) no tempo 15 min, sendo a única no tempo, que se diferenciou comparada as demais formulações. No tempo de 30 min, PMD não se diferenciou ($p > 0,05$) apenas de BLC, sendo a glicose incremental plasmática, considerada igual entre os dois tratamentos (Fig. 6A).

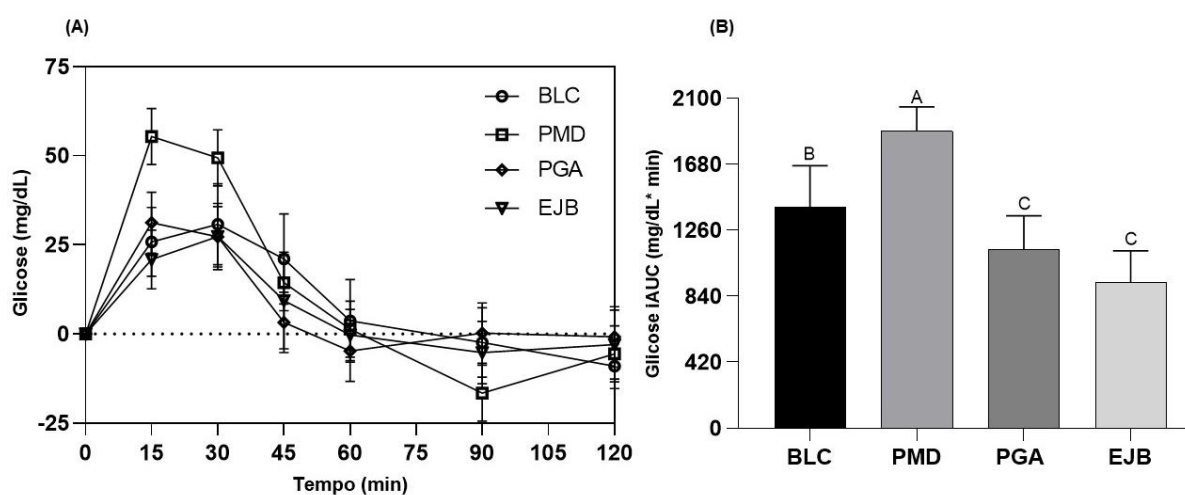


Fig. 6: Alterações incrementais na concentração de glicose plasmática pós-prandial (A) e a área incremental sob a curva (iAUC) para glicose plasmática pós-prandial (B) em voluntários saudáveis após consumir a BLC (bebida láctea controle); PMD (bebida láctea incorporada com microencapsulados de maltodextrina); PGA (bebida láctea incorporada com microencapsulados de goma arábica e EJB (bebida láctea incorporada de extrato).

Médias seguidas por letras diferentes para a área incremental sob a curva (iAUC) da glicose plasmática pós-prandial, indica diferença estatística ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. Os dados expressos em média \pm desvio padrão, $n = 12$.

Os maiores picos de glicose observado para PMD nos tempos de 15 e 30 min, deve-se principalmente a composição da maltodextrina, que apresenta de 2–3% de glicose e 5–7% de maltose. Neste sentido, o aumento da glicemia nos primeiros minutos, pode estar ligado diretamente ao material de parede utilizado e sua composição (Du et al., 2021; Xiao et al., 2022). Após o tempo de 30 min, nenhuma das formulações diferenciaram-se entre si ($p > 0,05$), sendo as alterações da glicose

plasmática, considerada igual até 120 min de coleta.

Ao analisar a área incremental sob a curva (iAUC) da glicose plasmática pós-prandial nos indivíduos saudáveis (Fig. 6B), verificou-se diminuições significativas ($p < 0,05$) na bebida láctea incorporada dos polifenóis microencapsulados com goma arábica (PGA) e do extrato concentrado de jabuticaba (EJB), rico em polifenóis, em relação a bebida controle (BLC). A PMD obteve a maior área incremental da glicose, podendo esses resultados estarem associados a própria composição de material de parede maltodextrina, como já discutido. As formulações PGA e EJB, demonstraram que tanto os fitoquímicos microencapsulados (PGA) quanto a incorporação do extrato de jabuticaba (EJB) na bebida láctea, podem contribuir para a diminuição da área incremental da glicose após seu consumo, reforçando o papel importante dos polifenóis na redução da glicemia. Os principais mecanismos para a diminuição da glicose plasmática, associada ao consumo de polifenóis, estão relacionados principalmente a inibição da α -amilase e α -glicosidase, enzimas envolvidas na digestão de carboidratos na dieta, redução dos picos de insulina, diminuição da peroxidação lipídica, aumento da capacidade antioxidante e redução de marcadores de estresse oxidativo plasmático (Annunziata et al., 2020; Ferreira et al., 2016; Seyyedebrahimi et al., 2018).

Resultados semelhantes foram encontrados para o iogurte enriquecido de antocianinas de arroz Riceberry (*Oryza sativa* L.), em que os autores observaram a diminuição significativa ($p < 0,05$) da iAUC de glicose para iogurte enriquecido com polifenóis, em relação ao controle, além do aumento do conteúdo fenólico total, cianidina-3-glicosídeo e peonidina-3-glicosídeo e melhora na capacidade antioxidante plasmática (Anuyahong et al., 2020).

Mesmo que os polifenóis microencapsulados com maltodextrina (PMD) não contribuíram para a redução da área incremental sob a curva (iAUC) da glicose pós-prandial, ainda assim, os polifenóis presentes na bebida podem contribuir principalmente para aumento das características antioxidantes do produto. Neste estudo, foi possível observar que o agente carreador, utilizado na microencapsulação também pode influenciar nas alterações glicêmicas dos produtos incorporados, sendo a escolha do material encapsulante, um dos aspectos importantes a serem avaliados.

4. CONCLUSÃO

A incorporação de polifenóis de jabuticaba em bebidas lácteas na forma de

microencapsulados com maltodextrina e goma arábica e de extrato concentrado contribui para elevação dos compostos bioativos, elevação da capacidade antioxidante e melhores aspectos de cor do produto, sendo associados à presença de fitoquímicos, principalmente a antocianina. Além disso, observou-se que a própria digestão gastrointestinal pode ser um veículo de extração dos polifenóis incorporados na bebida láctea, podendo levar a uma maior absorção desses compostos, através de quebra das associações, principalmente a polifenol-proteína.

Tal fato pode relacionar-se à redução da resposta glicêmica, verificada pela área incremental sob a curva (iAUC) na glicemia pós-prandial em indivíduos saudáveis, para as formulações incorporadas dos microencapsulados de goma arábica e do extrato concentrado de jabuticaba, quando comparada a bebida láctea controle. Assim, de modo geral, os bioativos extraídos da casca da jabuticaba, tanto os microencapsulados como o extrato, mostram-se como potencial uso na substituição de corantes artificiais, apresentam boa estabilidade durante o armazenamento e possibilitam a elevação das características funcionais dos produtos alimentícios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Edital Universal, proc. 409221/2018-0), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES e a cooperação do Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (CAPES/FAPES-PDPG, proc. 2021-5S41N) pelo financiamento do projeto e pela bolsa de estudos.

5. REFERÊNCIAS

- Albuquerque, B. R., Pereira, C., Calhelha, R. C., José Alves, M., Abreu, R. M. V., Barros, L., Oliveira, M. B. P. P., & Ferreira, I. C. F. R. (2020). Jaboticaba residues (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) are rich sources of valuable compounds with bioactive properties. *Food Chemistry*, 309(June 2019), 125735. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125735>
- Alminger, M., Aura, A. M., Bohn, T., Dufour, C., El, S. N., Gomes, A., Karakaya, S., Martínez-Cuesta, M. C., Mcdougall, G. J., Requena, T., & Santos, C. N. (2014). In vitro models for studying secondary plant metabolite digestion and bioaccessibility. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 413–436. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12081>
- Anders Bennick. (2016). Interaction of Plant Polyphenols with Salivary Proteins. *International & American Associations for Dental Research*, 13(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/154411130201300208>
- Annunziata, G., Jiménez-García, M., Capó, X., Moranta, D., Arnone, A., Tenore, G. C., Sureda, A., & Tejada, S. (2020). Microencapsulation as a tool to counteract the typical low bioavailability of polyphenols in the management of diabetes. *Food and Chemical Toxicology*, 139(March), 111248. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111248>
- Anuyahong, T., Chusak, C., & Adisakwattana, S. (2020). Incorporation of anthocyanin-rich riceberry rice in yogurts: Effect on physicochemical properties, antioxidant activity and in vitro gastrointestinal digestion. *LWT*, 129, 109571. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109571>
- Araujo, R. L. de, Tomás-Barberán, F. A., Santos, R. F. dos, Martinez-Blazquez, J. A., & Genovese, M. I. (2021). Postprandial glucose-lowering effect of cagaita (*Eugenia dysenterica* DC) fruit juice in dysglycemic subjects with metabolic syndrome: An exploratory study. *Food Research International*, 142, 110209. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2021.110209>
- Arruda, H. S., Silva, E. K., Araujo, N. M. P., Pereira, G. A., Pastore, G. M., & Junior, M. R. M. (2021). Anthocyanins recovered from agri-food by-products using innovative processes: Trends, challenges, and perspectives for their application in food systems. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26092632>
- Baldin, J. C., Munekata, P. E. S., Michelin, E. C., Polizer, Y. J., Silva, P. M., Canan, T. M., Pires, M. A., Godoy, S. H. S., Fávaro-Trindade, C. S., Lima, C. G., Fernandes, A. M., & Trindade, M. A. (2018). Effect of microencapsulated Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract on quality and storage stability of mortadella sausage. *Food Research International*, 108(March), 551–557. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.076>
- Balisteiro, D. M., Alezandro, M. R., & Genovese, M. I. (2013). Characterization and effect of clarified araçá (*Psidium guineenses* Sw.) juice on postprandial glycemia in healthy subjects. *Food Science and Technology*, 33(SUPPL.1), 66–74. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612013000500011>
- Borges, L. L. R., Oliveira, L. L. de, Freitas, V. V., Leite Júnior, B. R. de C., Nascimento, A. L. A. A., Castro, G. A. D., Fernandes, S. A., & Stringheta, P. C. (2022). Digestive enzymes inhibition, antioxidant and antiglycation activities of phenolic compounds from jaboticaba (*Plinia cauliflora*) peel. *Food Bioscience*, 50, 102195.

<https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2022.102195>

- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., Clemente, A., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Edwards, C., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., ... Recio, I. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols*, 14(4), 991–1014. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1>
- Cabral, B. R. P., de Oliveira, P. M., Gelfuso, G. M., Quintão, T. de S. C., Chaker, J. A., Karnikowski, M. G. de O., & Gris, E. F. (2018). Improving stability of antioxidant compounds from *Plinia cauliflora* (jaboticaba) fruit peel extract by encapsulation in chitosan microparticles. *Journal of Food Engineering*, 238(June), 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.004>
- Cássia, J. De, Rocha, G., Augusto, F., Barros, R. De, Tuler, Í., Wanessa, K., Viana, C., Miranda, G., Stephani, R., & César, P. (2019). Microencapsulation by atomization of the mixture of phenolic extracts. *Powder Technology*, 343, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.040>
- Chung, C., Rojanasasithara, T., Mutilangi, W., & McClements, D. J. (2015). Enhanced stability of anthocyanin-based color in model beverage systems through whey protein isolate complexation. *Food Research International*, 76, 761–768. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.003>
- Coe, S. A., Clegg, M., Armengol, M., & Ryan, L. (2013). The polyphenol-rich baobab fruit (*Adansonia digitata* L.) reduces starch digestion and glycemic response in humans. *Nutrition Research*, 33(11), 888–896. <https://doi.org/10.1016/J.NUTRES.2013.08.002>
- de Almeida, P. L., de Lima, S. N., Costa, L. L., de Oliveira, C. C., Damasceno, K. A., dos Santos, B. A., & Campagnol, P. C. B. (2015). Effect of jaboticaba peel extract on lipid oxidation, microbial stability and sensory properties of Bologna-type sausages during refrigerated storage. *Meat Science*, 110, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.06.012>
- de Sá, L. Z. C. M., Castro, P. F. S., Lino, F. M. A., Bernardes, M. J. C., Viegas, J. C. J., Dinis, T. C. P., Santana, M. J., Romão, W., Vaz, B. G., Lião, L. M., Ghedini, P. C., Rocha, M. L., & Gil, E. S. (2014). Antioxidant potential and vasodilatory activity of fermented beverages of jaboticaba berry (*Myrciaria jaboticaba*). *Journal of Functional Foods*, 8(1), 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.03.009>
- Di Maio, G., Pittia, P., Mazzarino, L., Maraschin, M., & Kuhnen, S. (2019). Cow milk enriched with nanoencapsulated phenolic extract of jaboticaba (*Plinia peruviana*). *Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1165–1173. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03579-y>
- Dos Reis Gallo, L. R., Reis, C. E. G., Mendonça, M. A., da Silva, V. S. N., Pacheco, M. T. B., & Botelho, R. B. A. (2021). Impact of gluten-free sorghum bread genotypes on glycemic and antioxidant responses in healthy adults. *Foods*, 10(10), 1–12. <https://doi.org/10.3390/foods10102256>
- Dragano, N. R. V., Marques, A. Y. C., Cintra, D. E. C., Solon, C., Morari, J., Leite-Legatti, A. V., Velloso, L. A., & Maróstica-Júnior, M. R. (2013). Freeze-dried jaboticaba peel powder improves insulin sensitivity in high-fat-fed mice. *British Journal of Nutrition*, 110(3), 447–455.

<https://doi.org/10.1017/S0007114512005090>

- Du, H., Wang, X., Yang, H., Zhu, F., Tang, D., Cheng, J., & Liu, X. (2022). Changes of phenolic profile and antioxidant activity during cold storage of functional flavored yogurt supplemented with mulberry pomace. *Food Control*, 132, 108554. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108554>
- Du, Q., Tang, J., Xu, M., Lyu, F., Zhang, J., Qiu, Y., Liu, J., & Ding, Y. (2021). Whey protein and maltodextrin-stabilized oil-in-water emulsions: Effects of dextrose equivalent. *Food Chemistry*, 339, 128094. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128094>
- Dutra, R. L. T., Dantas, A. M., Marques, D. de A., Batista, J. D. F., Meireles, B. R. L. de A., de Magalhães Cordeiro, Â. M. T., Magnani, M., & Borges, G. da S. C. (2017). Bioaccessibility and antioxidant activity of phenolic compounds in frozen pulps of Brazilian exotic fruits exposed to simulated gastrointestinal conditions. *Food Research International*, 100, 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.047>
- FAO, Food and Agriculture Organization. World Health Organization, WHO. *Carbohydrates in Human Nutrition*. WHO; Geneva, Switzerland: 1998.
- Ferreira, M. A., Silva, D. M., de Moraes, A. C., Mota, J. F., & Botelho, P. B. (2016). Therapeutic potential of green tea on risk factors for type 2 diabetes in obese adults – a review. In *Obesity Reviews* (Vol. 17, Issue 12, pp. 1316–1328). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/obr.12452>
- Fidelis, M., Sousa, J., Bragueto, G., Silva, R., Gomes, A., Mendanha, T., Boscacci, M., Barbosa, J., Araújo, M., Augusto, L., & Almeida, D. (2021). Polyphenols of jaboticaba [*Myrciaria jaboticaba* (Vell .) O . Berg] seeds incorporated in a yogurt model exert antioxidant activity and modulate gut microbiota of 1 , 2-dimethylhydrazine-induced colon cancer in rats. *Food Chemistry*, 334(May 2020), 127565. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127565>
- Freitas-Sá, D. D. G. C., de Souza, R. C., de Araujo, M. C. P., Borguini, R. G., de Mattos, L. da S., Pacheco, S., & Godoy, R. L. de O. (2018). Effect of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba* (Vell) O. Berg) and jamelão (*Syzygium cumini* (L.) Skeels) peel powders as colorants on color-flavor congruence and acceptability of yogurts. *Lwt*, 96(February), 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.024>
- Gashua, I. B., Williams, P. A., Yadav, M. P., & Baldwin, T. C. (2015). Characterisation and molecular association of Nigerian and Sudanese Acacia gum exudates. *Food Hydrocolloids*, 51, 405–413. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2015.05.037>
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2003). Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems. *Biochemical Engineering Journal*, 14(3), 217–225. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00221-8](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00221-8)
- Heidebach, T., Först, P., & Kulozik, U. (2012). Microencapsulation of Probiotic Cells for Food Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(4), 291–311. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.499801>
- Helal, A., & Tagliacuzzi, D. (2018). Impact of in-vitro gastro-pancreatic digestion on polyphenols and cinnamaldehyde bioaccessibility and antioxidant activity in stirred cinnamon-fortified yogurt. *LWT*, 89, 164–170. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2017.10.047>
- Holkem, A. T., Robichaud, V., Favaro-Trindade, C. S., & Lacroix, M. (2021). Chemopreventive Properties of Extracts Obtained from Blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora* Berg.) in Combination with Probiotics. *Nutrition and Cancer*, 73(4), 671–685.

<https://doi.org/10.1080/01635581.2020.1761986>

- Instituto Adolfo Lutz (2004) Procedimentos e determinações gerais. In: métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 4 ed. São Paulo, IMESP
- Jeong, C. H., Ryu, H., Zhang, T., Lee, C. H., Seo, H. G., & Han, S. G. (2018). Green tea powder supplementation enhances fermentation and antioxidant activity of set-type yogurt. *Food Science and Biotechnology*, 27(5), 1419–1427. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0370-9>
- Khalifa, I., Li, M., Mamet, T., & Li, C. (2019). Maltodextrin or gum Arabic with whey proteins as wall-material blends increased the stability and physiochemical characteristics of mulberry microparticles. *Food Bioscience*, 31(1), 100445. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100445>
- Khan, I. T., Nadeem, M., Imran, M., Ullah, R., Ajmal, M., & Jaspal, M. H. (2019). Antioxidant properties of Milk and dairy products : a comprehensive review of the current knowledge. *Lipids in Health and Disease*, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12944-019-0969-8>
- Kim, Y. A., Keogh, J. B., & Clifton, P. M. (2016). Polyphenols and glycémie control. *Nutrients*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/nu8010017>
- Kosińska-Cagnazzo, A., Diering, S., Prim, D., & Andlauer, W. (2015). Identification of bioaccessible and uptaken phenolic compounds from strawberry fruits in in vitro digestion/Caco-2 absorption model. *Food Chemistry*, 170, 288–294. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.070>
- Lamothe, S., Guérette, C., Dion, F., Sabik, H., & Britten, M. (2019). Antioxidant activity of milk and polyphenol-rich beverages during simulated gastrointestinal digestion of linseed oil emulsions. *Food Research International*, 122, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.068>
- Lappi, J., Raninen, K., Väkeväinen, K., Kårlund, A., Törrönen, R., & Kolehmainen, M. (2021). Blackcurrant (*Ribes nigrum*) lowers sugar-induced postprandial glycaemia independently and in a product with fermented quinoa: A randomised crossover trial. *British Journal of Nutrition*, 126(5), 708–717. <https://doi.org/10.1017/S0007114520004468>
- Lenquiste, S. A., Batista, A. G., Marineli, R. da S., Dragano, N. R. V., & Maróstica, M. R. (2012). Freeze-dried jaboticaba peel added to high-fat diet increases HDL-cholesterol and improves insulin resistance in obese rats. *Food Research International*, 49(1), 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.052>
- Lima, E. M. F., Madalão, M. C. M., Benincá, D. B., Saraiva, S. H., & Silva, P. I. (2019). Effect of encapsulating agent and drying air temperature on the characteristics of microcapsules of anthocyanins and polyphenols from juçara (*Euterpe edulis Martius*). *International Food Research Journal*, 26(2), 607–617.
- Lima, E. M. F., Madalão, M. C. M., dos Santos, W. C., Bernardes, P. C., Saraiva, S. H., & Silva, P. I. (2019). Spray-dried microcapsules of anthocyanin-rich extracts from *Euterpe edulis* M. as an alternative for maintaining color and bioactive compounds in dairy beverages. *Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4147–4157. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03885-5>
- Manzano, S., & Williamson, G. (2010). Polyphenols and phenolic acids from strawberry and apple decrease glucose uptake and transport by human intestinal Caco-2 cells. *Molecular Nutrition and Food Research*, 54(12), 1773–1780. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201000019>
- Marquetti, C., Dos Santos, T. B., Kaipera, K. F. C., Böger, B. R., Tonial, I. B., Wagner Junior, A., Lucchetta, L., & Do Prado, N. V. (2018). Jaboticaba skin flour: Analysis and sustainable alternative source to incorporate bioactive compounds and

- increase the nutritional value of cookies. *Food Science and Technology*, 38(4), 629–638. <https://doi.org/10.1590/fst.06717>
- Mateus, N., Carvalho, E., Luís, C., & De Freitas, V. (2004). Influence of the tannin structure on the disruption effect of carbohydrates on protein–tannin aggregates. *Analytica Chimica Acta*, 513(1), 135–140. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2003.08.072>
- Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu, C., Carrière, F., Boutrou, R., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Egger, L., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., Lesmes, U., Maclerzanka, A., MacKie, A., ... Brodkorb, A. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food—an international consensus. *Food and Function*, 5(6), 1113–1124. <https://doi.org/10.1039/c3fo60702j>
- Morais, M. L., Silva, A. C. R., Araújo, C. R. R., Esteves, E. A., & Dessimoni-Pinto, N. A. V. (2013). Determinação do potencial antioxidante in vitro de frutos do cerrado Brasileiro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35(2), 355–360. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000200004>
- Morales, P., Barros, L., Dias, M. I., Santos-Buelga, C., Ferreira, I. C. F. R., Ramirez Asquiere, E., & Berrios, J. D. J. (2016). Non-fermented and fermented jaboticaba (*Myrciaria cauliflora* Mart.) pomaces as valuable sources of functional ingredients. *Food Chemistry*, 208, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.011>
- Moura, M. H. C., Cunha, M. G., Alezandro, M. R., & Genovese, M. I. (2018). Phenolic-rich jaboticaba (*Plinia jaboticaba* (Vell.) Berg) extracts prevent high-fat-sucrose diet-induced obesity in C57BL/6 mice. *Food Research International*, 107, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.071>
- Mrabti, H. N., El Abbes Faouzi, M., Mayuk, F. M., Makrane, H., Limas-Nzouzi, N., Dibong, S. D., Cherrah, Y., Elombo, F. K., Gressier, B., Desjeux, J. F., & Eto, B. (2019). *Arbutus unedo* L., (Ericaceae) inhibits intestinal glucose absorption and improves glucose tolerance in rodents. *Journal of Ethnopharmacology*, 235(February), 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.02.013>
- Naczki, M., & Shahidi, F. (2004). Extraction and analysis of phenolics in food. In *Journal of Chromatography A* (Vol. 1054, Issues 1–2, pp. 95–111). <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.08.059>
- Neves, N. de A., Stringheta, P. C., Gómez-Alonso, S., & Hermosín-Gutiérrez, I. (2018). Flavonols and ellagic acid derivatives in peels of different species of jaboticaba (*Plinia* spp.) identified by HPLC-DAD-ESI/MSn. *Food Chemistry*, 252, 61–71. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.01.078>
- Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M., & Fernández-López, J. A. (2009). Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.013>
- Pandey, P., Grover, K., Dhillon, T. S., Kaur, A., & Javed, M. (2021). Evaluation of polyphenols enriched dairy products developed by incorporating black carrot (*Daucus carota* L.) concentrate. *Heliyon*, 7(5), e06880. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06880>
- Pinto, K. R. D., Tulini, F. L., Guimarães, J. das G. L., Moraes, I. C. F., Ditchfield, C., Lima, C. G. de, Silva, V. L. dos S., & Favaro-Trindade, C. S. (2023). Production and Evaluation of Yogurt Colored with Anthocyanin-Rich Pigment Prepared from Jaboticaba (*Myrciaria cauliflora* Mart.) Skin. *Processes*, 11(2), 526. <https://doi.org/10.3390/pr11020526>

- Prudencio, I. D., Prudêncio, E. S., Gris, E. F., Tomazi, T., & Bordignon-Luiz, M. T. (2008). Petit suisse manufactured with cheese whey retentate and application of betalains and anthocyanins. *LWT - Food Science and Technology*, 41(5), 905–910. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.019>
- Quatrin, A., Pauletto, R., Maurer, L. H., Minuzzi, N., Nichelle, S. M., Carvalho, J. F. C., Maróstica, M. R., Rodrigues, E., Bochi, V. C., & Emanuelli, T. (2019). Characterization and quantification of tannins, flavonols, anthocyanins and matrix-bound polyphenols from jaboticaba fruit peel: A comparison between *Myrciaria trunciflora* and *M. jaboticaba*. *Journal of Food Composition and Analysis*, 78(June 2018), 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.01.018>
- Quatrin, A., Rampelotto, C., Pauletto, R., Maurer, L. H., Nichelle, S. M., Klein, B., Rodrigues, R. F., Maróstica Junior, M. R., Fonseca, B. de S., de Menezes, C. R., Mello, R. de O., Rodrigues, E., Bochi, V. C., & Emanuelli, T. (2020). Bioaccessibility and catabolism of phenolic compounds from jaboticaba (*Myrciaria trunciflora*) fruit peel during in vitro gastrointestinal digestion and colonic fermentation. *Journal of Functional Foods*, 65(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103714>
- Righi da Rosa, J., Nunes, G. L., Motta, M. H., Fortes, J. P., Cezimbra Weis, G. C., Rychecki Hecktheuer, L. H., Muller, E. I., Ragagnin de Menezes, C., & Severo da Rosa, C. (2019). Microencapsulation of anthocyanin compounds extracted from blueberry (*Vaccinium* spp.) by spray drying: Characterization, stability and simulated gastrointestinal conditions. *Food Hydrocolloids*, 89, 742–748. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.11.042>
- Rocha, J. de C. G., Viana, K. W. C., Mendonça, A. C., Neves, N. de A., de CARVALHO, A. F., Minim, V. P. R., de BARROS, F. A. R., & Stringheta, P. C. (2019). Protein beverages containing anthocyanins of jaboticaba. *Food Science and Technology (Brazil)*, 39(1), 112–119. <https://doi.org/10.1590/fst.27917>
- Röhrig, B., Du Prel, J. B., Wachtlin, D., Kwiecien, R., & Blettner, M. (2010). Fallzahlplanung in klinischen studien: Teil 13 der serie zur bewertung wissenschaftlicher publikationen. *Deutsches Arzteblatt*, 107(31–32), 552–556. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2010.0552>
- Romão, P. V. M., Palozi, R. A. C., Guarnier, L. P., Silva, A. O., Lorençone, B. R., Nocchi, S. R., Moura, C. C. de F. S., Lourenço, E. L. B., Silva, D. B., & Gasparotto Junior, A. (2019). Cardioprotective effects of *Plinia cauliflora* (Mart.) Kausel in a rabbit model of doxorubicin-induced heart failure. *Journal of Ethnopharmacology*, 242(June), 112042. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112042>
- Rover, M. R., & Brown, R. C. (2013). Quantification of total phenols in bio-oil using the Folin-Ciocalteu method. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 366–371. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.06.011>
- Ścibisz, I., Ziarno, M., Mitek, M., & Zareba, D. (2012). Effect of probiotic cultures on the stability of anthocyanins in blueberry yoghurts. *LWT - Food Science and Technology*, 49(2), 208–212. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2012.06.025>
- Seyyedbrahimi, S. S., Khodabandehloo, H., Nasli Esfahani, E., & Meshkani, R. (2018). The effects of resveratrol on markers of oxidative stress in patients with type 2 diabetes: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial. *Acta Diabetologica*, 55(4), 341–353. <https://doi.org/10.1007/s00592-017-1098-3>
- Silva, S., Veiga, M., Costa, E. M., Oliveira, A. L. S., Madureira, A. R., & Pintado, M. (2018). Nanoencapsulation of polyphenols towards dairy beverage incorporation. In *Beverages* (Vol. 4, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/beverages4030061>

- Silva, V. L. M., Silva, A. C. O., Costa-Lima, B. R. C., Carneiro, C. S., & Conte-Junior, C. A. (2017). Stability of polyphenols from blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) in fermented dairy beverage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13305>
- Souza, M., Mesquita, A., Souza, P., Borges, G., Silva, T., Converti, A., & Maciel, M. I. (2021). New functional non-dairy mixed tropical fruit juice microencapsulated by spray drying: Physicochemical characterization, bioaccessibility, genetic identification and stability. *Lwt*, 152(June). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112271>
- Szkudelski, T. (2008). The insulin-suppressive effect of resveratrol - An in vitro and in vivo phenomenon. *Life Sciences*, 82(7–8), 430–435. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2007.12.008>
- Tagliacruzchi, D., Verzelloni, E., Bertolini, D., & Conte, A. (2010). In vitro bioaccessibility and antioxidant activity of grape polyphenols. *Food Chemistry*, 120(2), 599–606. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.10.030>
- TIBOR FULEKI and F. J. FRANCIS. (1968). Quantitative Methods for Anthocyanins. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE*, 33, 72–77. <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.1968.tb00887.x>
- Trindade, P. L., Soares, E. D. R., Inada, K. O. P., Martins, F. F., Rudnicki, M., Perrone, D., Monteiro, M., Souza-Mello, V., & Daleprane, J. B. (2022). Consumption of phenolic-rich jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) powder ameliorates obesity-related disorders in mice. *British Journal of Nutrition*, 127(3), 344–352. <https://doi.org/10.1017/S0007114521001136>
- Wallace, T. C., & Giusti, M. M. (2008). Determination of color, pigment, and phenolic stability in yogurt systems colored with nonacylated anthocyanins from *Berberis boliviana* L. as compared to other natural/synthetic colorants. *Journal of Food Science*, 73(4). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00706.x>
- Wang, Y., Zhang, J., & Zhang, L. (2021). Anthocyanin-Dietary Proteins Interaction and Its Current Applications in Food Industry. In *Food Reviews International*. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012189>
- Xiao, Z., Xia, J., Zhao, Q., Niu, Y., & Zhao, D. (2022). Maltodextrin as wall material for microcapsules: A review. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120113. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120113>
- Xie, Y., Kosińska, A., Xu, H., & Andlauer, W. (2013). Milk enhances intestinal absorption of green tea catechins in in vitro digestion/Caco-2 cells model. *Food Research International*, 53(2), 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.063>
- Zorenc, Z., Veberic, R., Stampar, F., Koron, D., & Mikulic-Petkovsek, M. (2017). Thermal stability of primary and secondary metabolites in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) purees. *LWT - Food Science and Technology*, 76, 79–86. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.10.048>

CONCLUSÃO GERAL

A maltodextrina e a goma arábica podem ser eficientes agentes carreadores para a microencapsulação por *spray drying* dos polifenóis da jabuticaba, apresentando boa retenção dos compostos bioativos e alta capacidade antioxidante nos pós produzidos. Os microencapsulados demonstraram alta solubilidade, baixa higroscopicidade, parâmetros atrativos de cor, termoresistência, e são caracterizados como semicristalinos, atributos desejáveis em alimentos em pó e para utilização na indústria de alimentos.

A incorporação dos microencapsulados e do extrato concentrado na bebida láctea, elevou principalmente sua capacidade antioxidante, estável durante todo o armazenamento, assim como o conteúdo de fenólicos totais, pH e acidez. As bebidas obtiveram atributos desejáveis de cor, após a incorporação dos polifenóis, até o último dia de armazenamento, mesmo com a degradação das antocianinas, o que levou a uma discreta diminuição do parâmetro a^* . A simulação gastrointestinal realizada nas bebidas, mostrou um aumento tanto nos valores brutos do conteúdo de fenólicos totais, quanto de antocianinas, levantando a hipótese de que a simulação gastrointestinal promoveu uma maior extração dos compostos da bebida, podendo estar associada à atividade das enzimas proteolíticas, que promoveram uma dissociação entre a interação polifenol-proteína, o que pode aumentar a biodisponibilidade desses compostos. As bebidas lácteas incorporadas do extrato concentrado e dos microencapsulados de goma arábica, obtiveram as menores respostas glicêmicas em indivíduos saudáveis, indicando que os polifenóis da jabuticaba, podem reduzir a resposta glicêmica nesses produtos.

Os bioativos presentes na casca da jabuticaba podem ser uma excelente fonte de compostos antioxidantes, e podem ser considerados biorresíduos valiosos. A microencapsulação desses fitoquímicos pode aumentar sua estabilidade e permitir a utilização em diversas matrizes alimentares, melhorando principalmente os aspectos de cor e funcionalidade dos alimentos.

APÊNDICE A – FICHA DE RECRUTAMENTO DOS VOLUNTÁRIOS PARA A RESPOSTA GLICÊMICA

Nome Completo _____ Sexo: F () M ()

Idade _____ Profissão _____ Escolaridade _____

Endereço _____ nº _____

Bairro _____ Cidade _____

Complemento _____

Celular () _____ - _____ Telefone Residencial () _____ - _____

E-mail _____

Peso _____ kg Altura _____ m IMC _____
kg/m²

Valor da glicemia - mg/dL (avaliada no momento da entrevista):

Uso de medicamento/Suplemento: Sim () Não () Qual _____

Prática atividade física: Sim () Não () Horário _____

Você manteve seu peso nos últimos 3 meses? Sim () Não ()

Caso a resposta seja “não”, quantos kg ganhou ou perdeu?

Possui alguma doença crônica como doenças do coração, hipotireoidismo, hipertireoidismo, pressão alta, doenças gastrointestinais: Sim () Não ()

Qual _____

Gestante: Sim () Não () Lactante: Sim () Não ()

Diabético ou faz uso de medicamentos para o controle do diabetes?

Sim () Não () Intolerante a lactose: Sim () Não ()

Fumante: Sim () Não () Etilista: Sim () Não ()

Possui alguma alergia alimentar: Sim () Não () Qual _____

Alergia a proteína do leite : Sim () Não ()

Consome iogurte ou bebida Láctea: Sim () Não ()

Frequência de consumo semanal _____

Orientações:

O voluntário não deverá consumir bebidas alcoólicas, ou qualquer tipo de bebida 12 horas antes dos testes, (apenas água é permitido) e não praticar atividades físicas intensas 24 horas antes dos testes, além de evitar alimentos e bebidas ricas em polifenóis (chocolate, vinho, frutas vermelhas, café e chá), evitando seu consumo no dia e na noite anterior a manhã da análise.

APÊNDICE B- FICHA INDIVIDUAL DE MONITORAMENTO DA GLICEMIA CAPILAR

Nome do Voluntário: _____

Data: / /

BLC	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	----------------

Data: / /

PMD	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	----------------

Data: / /

PGA	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	----------------

Data: / /

EJB	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min
------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	----------------

APÊNDICE C - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

O(A) Sr.(a) _____, está sendo convidado(a) a participar da pesquisa intitulada “Microencapsulação de polifenóis extraídos da jabuticaba (*Myrciaria jaboticaba*) por *spray drying* e aplicação em sistema-modelo de bebida láctea: aspectos físico-químicos, estabilidade, bioacessibilidade e resposta glicêmica”, sob a responsabilidade da Prof^a. Pollyanna Ibrahim Silva.

JUSTIFICATIVA

Os frutos da jabuticaba são muito ricos em compostos promotores de saúde, porém, por ser tratar de um fruto muito perecível, ocorre um menor consumo destes. A maioria dos compostos promotores de saúde presentes na jabuticaba estão concentrados em sua casca, sendo essa parte, considerada resíduo, e geralmente descartada. É importante estudar o maior aproveitamento da casca da jabuticaba e de seus compostos promotores de saúde, aplicando-as em alimentos como bebidas lácteas. Neste estudo, a influência da ingestão destas bebidas lácteas na glicemia de pessoas saudáveis será analisada, e espera-se que as bebidas lácteas incorporadas dos produtos da jabuticaba apresentem menores respostas glicêmicas.

OBJETIVO(S) DA PESQUISA

Analisar a incorporação de microencapsulados de extrato de casca de jabuticaba em bebida láctea e seus efeitos sobre a resposta glicêmica em indivíduos saudáveis.

PROCEDIMENTOS

Para completar todo o estudo, será necessário que o Sr.(a) vá ao laboratório 6 (seis) vezes, e todas as vezes, em jejum de 10-12 horas antes dos testes, de manhã (07:00 horas). Assim, esta análise será realizada em 6

(seis) sessões, com um intervalo de 3 (três) a 7 (sete) dias entre as sessões. Durante essas seis sessões, o(a) Sr(a) irá ingerir 200 mL das formulações de bebidas lácteas incorporadas com compostos extraídos da casca da jabuticaba em até 10 minutos. Sua glicemia será analisada usando um glicosímetro digital, com pequenas picadas nos dedos das suas mãos. A glicemia será medida imediatamente antes do consumo da bebida, e depois nos tempos 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos após a ingestão, ou seja, 7 (sete vezes). Durante o período do teste, o Sr.(a) deve permanecer nas dependências, apenas fazendo a ingestão de água, caso queira, lendo, ouvindo música ou acessando a internet. Todos os procedimentos seguirão as recomendações da Organização Mundial da Saúde para prevenção da disseminação do coronavírus.

DURAÇÃO E LOCAL DA PESQUISA

As análises durarão cerca de duas horas e ocorrerão no Laboratório de Nutrição Experimental da Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre – ES.

RISCOS E DESCONFORTOS

Os possíveis riscos do estudo são: desconforto provocado pelo período de jejum; a quantidade de bebida láctea a ser ingerida para o teste no tempo de 10 minutos, uma leve ardência ou dor provocada pela picada da agulha no dedo para a coleta do sangue em cada um dos dedos das mãos. O indivíduo será orientado a deixar a mão pendente no momento da coleta do material para melhorar o fluxo sanguíneo e minimizar possíveis dores ou desconfortos, o local da picada será na polpa ou lateral do dedo (onde a sensibilidade é reduzida) para diminuir a dor, sendo a coleta realizada em diferentes dedos. Antes das coletas, os dedos serão higienizados com álcool 70%. O condutor das coletas fará uso de luvas descartáveis, entre outros paramentos necessários para evitar possíveis contaminações ou infecções. As coletas serão conduzidas utilizando lancetas descartáveis, e os materiais serão descartados conforme orientado pelo manual de boas práticas do laboratório. O desconforto do jejum poderá ser aliviado com o consumo da bebida teste, sendo que o desconforto que eventualmente poderá ser provocado pela

ingestão da bebida teste, amenizado com ingestão de pequenos goles de água. O participante (voluntário) terá liberdade de abandonar o experimento a qualquer momento, caso este esteja lhe causando algum tipo de desconforto.

BENEFÍCIOS

Os benefícios que o estudo pode trazer incluem: A possibilidade de conhecer e consumir alimentos inovadores, incorporados com os extratos e compostos em pó da casca da jabuticaba, além do conhecimento sobre a resposta glicêmica provocada pelo consumo da bebida láctea incorporada com estes componentes, contribuindo também para o conhecimento a respeito dos benefícios dos compostos promotores da saúde do fruto e seu efeito na redução da glicemia pós-prandial (após a refeição) de indivíduos saudáveis.

ACOMPANHAMENTO E ASSISTÊNCIA

Se você apresentar algum efeito adverso relacionado diretamente à pesquisa, você receberá acompanhamento, assistência e orientação, conforme o caso.

GARANTIA DE RECUSA EM PARTICIPAR DA PESQUISA E/OU RETIRADA DE CONSENTIMENTO

Você não é obrigado(a) a participar da pesquisa, podendo deixar de participar dela em qualquer momento de sua execução, sem que haja penalidades ou prejuízos decorrentes de sua recusa. Caso decida retirar seu consentimento, você não mais será contatado(a) pelos pesquisadores e todos os dados coletados serão imediatamente excluídos dos bancos de dados.

GARANTIA DE MANUTENÇÃO DO SIGILO E PRIVACIDADE

Os pesquisadores se comprometem a resguardar sua identidade durante todas as fases da pesquisa, inclusive após a publicação. Não haverá compartilhamento de informações pessoais, assegurando os princípios éticos desta pesquisa.

GARANTIA DE RESSARCIMENTO FINANCEIRO

Caso haja alguma despesa com a participação da pesquisa, o participante tem o direito de ser ressarcido. Entretanto, não haverá nenhum ônus ou gasto envolvido em sua participação. Todos os custos diretos e

indiretos da pesquisa, caso haja, serão assumidos pelo pesquisador.

GARANTIA DE INDENIZAÇÃO

O participante tem o direito resguardado de acionar a justiça e solicitar indenização, caso se sinta prejudicado ou sofra algum dano decorrente da sua participação na pesquisa.

ESCLARECIMENTO DE DÚVIDAS

Em caso de dúvidas sobre a pesquisa ou para relatar algum problema, o (a) Sr.(a) pode contatar a pesquisadora Pollyanna Ibrahim Silva, nos telefones 28 35528638; 28 981119369, ou e-mail: pollyanna.silva@ufes.br ou no Departamento de Engenharia de Alimentos - CCAE/UFES, Campus Alegre.

O(A) Sr.(a) também pode contatar o Comitê de Ética em Pesquisa do Campus de Alegre da Universidade Federal do Espírito Santo (CEP/Alegre/UFES), por meio do telefone (28) 3552-8771, e-mail cep.alegre.ufes@gmail.com ou correio: Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos, Prédio Administrativo do Campus de Alegre, Alto Universitário, s/n, caixa postal 16, Bairro Guararema, CEP 29.500-000, Alegre-ES, Brasil. O CEP/Alegre/UFES tem a função de analisar projetos de pesquisa visando à proteção dos participantes dentro de padrões éticos nacionais e internacionais. Seu horário de funcionamento é de segunda a sexta-feira, das 8h às 11h.

Declaro que fui verbalmente informado e esclarecido sobre o presente documento, entendendo todos os termos acima expostos, e que voluntariamente aceito participar deste estudo. Também declaro ter recebido uma via deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, de igual teor, assinada pelo(a) pesquisador(a) principal ou seu representante, rubricada em todas as páginas.

Alegre, _____ de _____ de 2022.

Participante da pesquisa

Na qualidade de pesquisador responsável pela pesquisa “Microencapsulação de polifenóis extraídos da jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) por *spray drying* e aplicação em sistema-modelo de bebida láctea: aspectos físico-químicos, estabilidade, bioacessibilidade e resposta glicêmica”, eu, Pollyanna Ibrahim Silva, declaro ter cumprido as exigências do(s) item(s) IV.3 e IV.4 (se pertinente), da Resolução CNS 466/12, a qual estabelece diretrizes e normas regulamentadoras de pesquisas envolvendo seres humanos.

Pollyanna Ibrahim Silva –
pesquisadora responsável

APÊNDICE D- MONITORAMENTO DAS ALTERAÇÕES GLICÊMICAS POR TEMPO

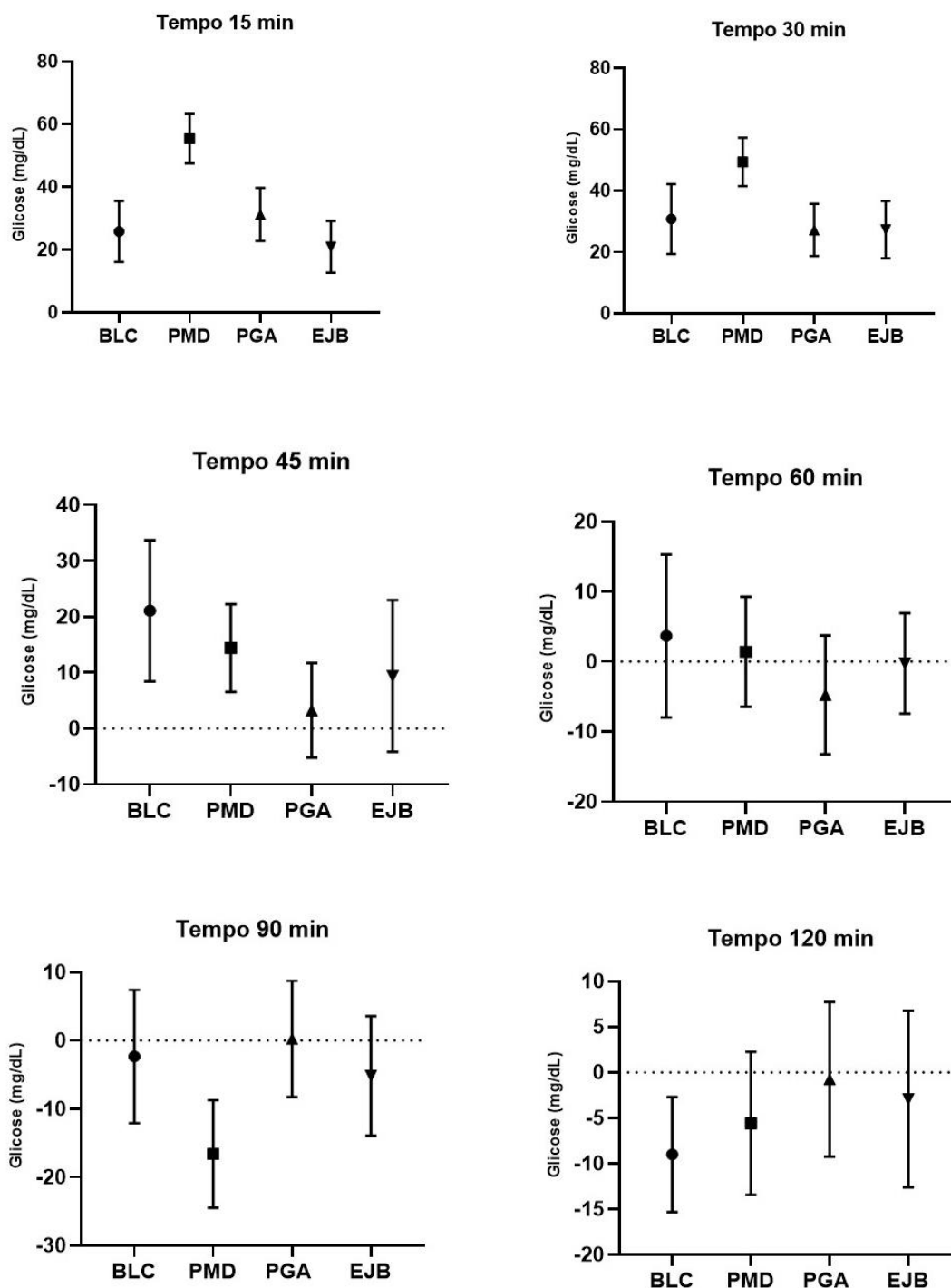


Fig. 7: Alterações incrementais na concentração de glicose plasmática pós-prandial por tempo. BLC (bebida láctea controle); PMD (bebida láctea incorporada com microencapsulados de maltodextrina); PGA (bebida láctea incorporada com microencapsulados de goma arábica e EJB (bebida láctea incorporada de extrato).