

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA - UEPG
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

LEIDE GRACIELA BLANCO MATTJE

EFEITO DA SECAGEM DO BAGAÇO DE MAÇÃ NA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS
FENÓLICOS E SUA INFLUÊNCIA NA COMPOSIÇÃO AROMÁTICA DE BEBIDA
FERMENTADA

PONTA GROSSA
2025

LEIDE GRACIELA BLANCO MATTJE

EFEITO DA SECAGEM DO BAGAÇO DE MAÇÃ NA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS
FENÓLICOS E SUA INFLUÊNCIA NA COMPOSIÇÃO AROMÁTICA DE BEBIDA
FERMENTADA

Tese apresentada para obtenção de título de
Doutora em Ciência e Tecnologia de
Alimentos na Universidade Estadual de
Ponta Grossa, Área de Ciência e Tecnologia
de Alimentos.

Orientadora: Dr^a Aline Alberti

PONTA GROSSA
2025

M444 Mattje, Leide Graciela Blanco
Efeito da secagem do bagaço de maçã na extração de compostos fenólicos e sua influência na composição aromática de bebida fermentada / Leide Graciela Blanco Mattje. Ponta Grossa, 2025.
149 f.

Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Área de Concentração: Ciências e Tecnologia de Alimentos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Alberti.

1. Sidra. 2. Aroma. 3. Micro-ondas. 4. Aproveitamento - resíduos. 5. Liofilização. I. Alberti, Aline. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ciências e Tecnologia de Alimentos. III.T.

CDD: 664

TERMO DE APROVAÇÃO

LEIDE GRACIELA BLANCO MATTJE

“Efeito da secagem do bagaço de maçã na extração de compostos fenólicos e sua influência na composição aromática de bebida fermentada”.

Tese aprovada como requisito para obtenção do grau de Doutor(a) no Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Profa. Dra. Aline Alberti - UEPG-PR

Documento assinado digitalmente
 **ALINE ALBERTI**
Data: 08/05/2025 18:54:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Aline Alberti
UEPG-PR -Presidente

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO BERGLER BITENCOURT**
Data: 14/05/2025 11:21:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Bergler Bitencourt
UFFS-PR - Membro Titular Externo

Documento assinado digitalmente
 **SUELEN AVILA**
Data: 08/05/2025 20:16:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Suelen Ávila Berthier
UFPR-PR - Membro Titular Externo

Documento assinado digitalmente
 **RENATA DINNIES SANTOS SALEM**
Data: 15/05/2025 16:22:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Renata Dinnies Santos Salem
UEPG-PR - Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ GUSTAVO LACERDA**
Data: 15/05/2025 18:48:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Gustavo Lacerda
UEPG-PR - Membro Titular Interno

Ponta Grossa, 08 de maio de 2025.

Dedico esta minha tese à minha família e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu alcançasse este importante marco em minha vida. Com um carinho especial, dedico-a ao meu filho Mateus e ao meu esposo Hugo, cujo amor e apoio foram fundamentais nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela força, amparo e coragem concedidas durante cada etapa desta jornada.

Ao meu filho e ao meu esposo, que foram minha base, meu refúgio e minha maior motivação ao longo desta jornada acadêmica. O amor, o apoio incondicional e a paciência de vocês tornaram cada desafio mais leve.

A toda minha família, pelo carinho, incentivo e por estarem ao meu lado, tornando esta jornada mais significativa.

Ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), pela confiança, apoio e oportunidade de cursar esta pós-graduação, permitindo-me trilhar um caminho de aprendizado, crescimento pessoal e aprimoramento profissional.

Aos meus colegas de trabalho, pelo apoio, generosidade, compreensão e pelo compromisso em assumir minhas responsabilidades profissionais durante minha licença para o doutorado, permitindo que eu me dedicasse integralmente a esta jornada acadêmica.

À minha orientadora, prof^a. Dra. Aline Alberti, cuja sabedoria, dedicação e incentivo foram essenciais para a realização deste trabalho. Sua orientação foi um suporte ao longo do caminho.

Ao Grupo de Trabalho sobre Maçã e a todos os colegas de laboratório e do programa de pós-graduação, pela colaboração, troca de conhecimentos e pelo apoio essencial ao longo deste processo.

Ao Complexo de Laboratório Multiusuários (C-Labmu) da UEPG, pelo suporte e cessão de seus laboratórios para a realização das diversas análises que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao prof. Dr. Bruno da Silva e ao técnico de laboratório Thiago dos Santos, do Laboratório de Espectrometria de Massas da UFPR, pela disponibilidade, apoio técnico e contribuições para o desenvolvimento da cromatografia gasosa deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela generosidade ao dedicarem seu tempo para avaliar este trabalho, pelas valiosas contribuições e reflexões que enriqueceram este estudo. Suas sugestões foram fundamentais para o aprimoramento desta pesquisa.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, seja com palavras de apoio, seja compartilhando momentos de aprendizado e superação. A amizade e o companheirismo de vocês foram fundamentais para manter a motivação e seguir adiante.

A todos, que de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, meu sincero e profundo agradecimento.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein

RESUMO

A maçã (*Malus domestica*) é uma das frutas mais conhecidas e consumidas mundialmente, destacando-se por ser rica em vitaminas, fibras e compostos bioativos, como os fenólicos. Esses compostos trazem benefícios à saúde, mas também podem melhorar a durabilidade dos alimentos e bebidas e influenciar as características sensoriais, como aroma, cor e sabor. Entre os diversos produtos derivados da maçã, o suco de maçã preserva parte das propriedades nutricionais da fruta e auxilia no combate dos radicais livres, contribuindo, por exemplo, para a saúde cardiovascular. Outro produto relevante é a sidra, uma bebida fermentada a partir do suco ou mosto de maçã, cujo aroma desempenha um importante papel na sua qualidade, identidade e aceitação pelos consumidores. Durante o processamento da maçã para a produção de suco e sidra, gera-se uma quantidade significativa de bagaço. Apesar de geralmente ser descartado, esse resíduo é rico em compostos fenólicos, que possuem potencial para aplicação no desenvolvimento aromático de bebidas. Para que esses compostos sejam mais bem aproveitados, a secagem do bagaço torna-se uma etapa essencial, pois garante sua estabilidade microbiológica e viabiliza a extração dos compostos bioativos. Este estudo teve início com uma revisão bibliográfica, buscando reunir informações relevantes de pesquisas anteriores sobre maçãs, compostos fenólicos, o aproveitamento de subprodutos da maçã e suas aplicações na indústria, além dos métodos de secagem e aromas de bebidas. Visando o aproveitamento desse subproduto, o presente estudo avaliou três técnicas de secagem: liofilização, micro-ondas e estufa de circulação de ar quente. A liofilização foi a técnica que melhor preservou os compostos fenólicos e a capacidade antioxidante, embora seja demorada. A secagem por micro-ondas, por sua vez, combinou rapidez com boa preservação dos compostos, enquanto o uso da estufa resultou em maior degradação dos fenólicos. O extrato de compostos fenólicos obtido a partir da liofilização foi adicionado a bebidas para investigar sua influência na fermentação e na formação dos compostos aromáticos. Para isso, também foi utilizada uma formulação de mosto artificial, permitindo analisar de forma controlada o efeito da adição desses compostos no desenvolvimento dos compostos voláteis na sidra. Os resultados mostraram que tanto os mostos quanto as sidras com adição de extratos fenólicos apresentaram modificações positivas no perfil volátil, com atuação das leveduras sobre os compostos adicionados, alterando o perfil aromático da bebida. A adição dos extratos influenciou a cinética fermentativa, as propriedades bioativas e os compostos voláteis tanto do mosto quanto da sidra, resultando uma fermentação mais eficiente e ajudando a manter a atividade antioxidante, embora com a redução de alguns compostos fenólicos e aromáticos ao longo do processo. A análise sensorial da sidra elaborada a partir do mosto de maçã revelou perfis aromáticos distintos, variando de um aroma intenso de maçã na sidra com adição de ácido clorogênico, até um aroma mais suave, porém com maior adição de extrato fenólico. Dentre as formulações testadas, a sidra com 25% de compostos fenólicos se destacou por apresentar equilíbrio e intensidade aromática. Esses resultados demonstram que a adição de compostos fenólicos extraídos do bagaço da maçã pode aprimorar a qualidade sensorial e funcional das bebidas, agregando benefícios à saúde e promovendo um perfil aromático mais complexo. Além disso, a utilização desses extratos contribui para o aproveitamento de subprodutos agroindustriais, promovendo práticas sustentáveis e inovadoras no setor de bebidas fermentadas.

Palavras-chave: Sidra. Aroma. Micro-ondas. Aproveitamento de resíduos. Liofilização.

ABSTRACT

The apple (*Malus domestica*) is one of the most widely known and consumed fruits globally, rich in vitamins, fiber, and bioactive compounds such as phenolics. These compounds provide various health benefits, can enhance the shelf life of food and beverages, and influence sensory characteristics such as aroma, color, and flavor. Among the diverse apple-derived products, apple juice retains some of the fruit's nutritional properties and helps combat free radicals, contributing, for example, to cardiovascular health. Another important product is cider, a fermented beverage made from apple juice or must, whose aroma plays a key role in determining its quality, identity, and consumer acceptance. During the production of apples juice and cider, a significant amount of pomace is generated. Although commonly discarded, this by-product is rich in phenolic compounds with potential applications in the aromatic enhancement of beverages. To better utilize these compounds, drying the pomace is an essential step, as it ensures microbiological stability and facilitates the extraction of bioactive compounds. This study began with a comprehensive literature review, collecting relevant data on apples, phenolic compounds, the use of apple by-products and their industrial applications, as well as drying techniques and beverage aromas. In order to maximize the utility of apple pomace, three drying techniques were evaluated: freeze-drying, microwave drying, and hot-air oven drying. Freeze-drying was the most effective in preserving phenolic compounds and antioxidant capacity, despite being time-consuming. Microwave drying, on the other hand, offered a balance between speed and preservation of the compounds, while oven drying resulted in greater degradation of the phenolic content. Phenolic extracts obtained from freeze-dried pomace were added to beverages to assess their influence on fermentation and the formation of aromatic compounds. An artificial must formulation was used to allow controlled analysis of how these compounds effect the development of volatile compounds in cider. The results indicated that both musts and ciders enriched with phenolic extracts exhibited positive changes in their volatile profile, with yeasts interacting with the added compounds, thus altering the aromatic characteristics of the final beverage. The addition of the extracts also influenced the fermentation kinetics, bioactive properties, and volatile compound formation, resulting in more efficient fermentation and the preservation of antioxidant activity, although some phenolic and aromatic compounds were reduced throughout the process. Sensory analysis of the cider made from apple must revealed distinct aromatic profiles, ranging from an intense apple aroma in the cider with added chlorogenic acid to a milder aroma, but with a greater addition of phenolic extract. Among the tested formulations, the cider with 25% phenolic compounds stood out for its balance and aromatic intensity. These findings demonstrate that incorporating phenolic compounds extracted from apple pomace can enhance both the sensory and functional qualities of fermented beverages, offering health benefits and contributing to a more complex aromatic profile. These results demonstrate that the addition of phenolic compounds extracted from pomace can enhance the sensory and functional quality of beverages, providing health benefits and promoting a more complex aromatic profile. Furthermore, the use of these extracts supports the valorization of agro-industrial by-products, fostering sustainable and innovative practices in the fermented beverage sector.

Keywords: Cider. Aroma. Microwave. Freeze-Drying. Waste Valorization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama dos processos de secagens do bagaço de maçã para obtenção de extratos e aplicação do extrato mais eficiente no mosto para fermentação da sidra.....	15
Figura 1.1 - Imagens da maçã gala.....	22
Figura 1.2 - Fotos do bagaço e mosto de maçã após o processamento	32
Figura 2.1 - Dados experimentais da razão de umidade (adimensional) em função do tempo (minutos) para a secagem do bagaço de maçãs Gala em micro-ondas e estufa de circulação de ar quente.....	56
Figura 2.2 - Modelagem em relação a razão de umidade (adimensional) no processo de secagem do bagaço de maçã em micro-ondas 509W e 610W, e estufa de circulação de ar a 40 °C, 50 °C e 60 °C.....	60
Figura 2.3 - Imagens por microscopia eletrônica de varredura por diversos métodos de secagem.....	62
Figura 2.4 - Representação das cores das amostras a partir nas coordenadas colorimétricas obtidas por espectrofotometria (A) e imagens dos bagaços secos (B) em diferentes técnicas de secagem.....	65
Figura 3.1 - Representação colorimétricas das amostras de sidra artificial com base nas coordenadas colorimétricas L*a*b* obtidas por espectrofotometria.....	86
Figura 3.2 - Análise de <i>clustering</i> e mapa de calor da distribuição de valores entre as diferentes sidras artificiais.	89
Figura 3.3 - Análise de mapa de calor entre compostos fenólicos e compostos voláteis aromáticos.....	90
Figura 4.1 - Foto das diferentes amostras de sidra.....	103
Figura 4.2 - Representação visual das cores das diferentes amostras de mostos e sidras com base nas coordenadas colorimétricas obtidas por espectrofotometria.....	112
Figura 4.3 - Análise de <i>clustering</i> e mapa de calor da distribuição de valores entre as diferentes sidras elaboradas com mosto de maçã.....	121
Figura 4.4 - PCA dos compostos voláteis das sidras.....	122
Figura 4.5 - Resultado estatístico da identificação das principais notas de aroma.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 - Produção de maçãs no Brasil	24
Gráfico 1.2 - Composição do bagaço de maçã	33
Gráfico 3.1 - Dinâmica da fermentação alcoólica das sidras artificiais sob diferentes adições de compostos fenólicos e extratos.....	82
Gráfico 4.1 - Dinâmica da fermentação alcoólica das sidras sob diferentes adições de compostos fenólicos e extratos	106
Gráfico 4.2 - Áreas relativas da somatória dos picos (%) das principais classes de compostos voláteis dos mostos e sidras naturais.....	113
Gráfico 4.3 - Intensidade do aroma nas Sidras (%).....	126
Gráfico 4.4 - Análise da aceitabilidade (agradabilidade) do aroma das diversas formulações das Sidras.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Composição nutricional da maçã com Casca <i>in natura</i>	25
Tabela 1.2 - Descrição dos compostos fenólicos.....	27
Tabela 1.3 - Principais compostos voláteis da maçã cv. gala <i>in natura</i> , suco de maçã, bagaço de maçã e sidra	37
Tabela 2.1- Modelos matemáticos usados na modelagem da secagem do bagaço de maçã ...	48
Tabela 2.2 - Parâmetros cromatográficos de compostos fenólicos analisados por HPLC.....	52
Tabela 2.3 - Parâmetros de secagem e umidade final das amostras	55
Tabela 2.4 - Parâmetros dos modelos matemáticos na secagem de bagaço de maçã em micro-ondas nas potências 509W e 610W e estufa de circulação de ar quente a temperaturas de 40 °C, 50° C e 60 °C	59
Tabela 2.5 - Parâmetros de cor das amostras de bagaço de maçã secos.....	63
Tabela 2.6 - Concentração de fenóis totais (mg CAE/kg), flavonoides totais (mg CAT/kg), capacidade antioxidante (µmol TE/kg) pelos métodos de ABTS, DPPH e FRAP e perfil de fenólicos individuais (mg/kg) nos extratos das diferentes técnicas de secagem	67
Tabela 3.1 - Composição para o preparo de 1 (um) litro de mosto artificial.....	74
Tabela 3.2 - Parâmetros cinéticos de fermentação alcoólica das sidras artificiais e de maçã...	81
Tabela 3.3 - Concentração de fenóis totais (mg CAE/L), flavonoides totais (mg CAT/L), capacidade antioxidante (µmol TE/L) pelos métodos de ABTS, DPPH e FRAP e perfil de fenólicos individuais (mg/L) nas sidras artificiais.....	84
Tabela 3.4 - Análise colorimétrica da sidra artificial.....	85
Tabela 3.5 - Composição dos compostos aromáticos detectados por cromatografia gasosa nas sidras artificiais.....	87
Tabela 4.1 - Diferentes tratamentos aplicados aos mostos e sidras	97
Tabela 4.2 - Parâmetros cinéticos de fermentação alcoólica das sidras artificiais e de maçã.	105
Tabela 4.3 - Concentração de fenóis totais (mg CAE/L), flavonoides totais (mg CAT/L), capacidade antioxidante (µmol TE/L) pelos métodos de ABTS, DPPH e FRAP e perfil de fenólicos individuais (mg/L) nos mostos e nas sidras.....	108
Tabela 4.4 - Análise de colorimétrica do mosto de maçã e sidra natural.....	110
Tabela 4.5 - Composição dos compostos voláteis aromáticos (em porcentagem da área total dos picos) detectados por cromatografia gasosa nos mostos e sidras de maçã...	115

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	14
INTRODUÇÃO.....	16
OBJETIVOS.....	18
CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA	19
1.1 INTRODUÇÃO.....	19
1.2 METODOLOGIA.....	20
1.3 RESULTADOS DA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA	21
1.3.1 Maçã	21
1.3.1.1 Produção de maçã.....	23
1.3.1.2 Características nutricionais e funcionais da maçã	25
1.3.1.3 Produtos e subprodutos de maçã	29
1.3.2 Aromas e compostos voláteis	35
1.3.3 Secagem de alimentos	39
1.3.3.1 Natural	40
1.3.3.2 Artificial	40
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
CAPÍTULO 2 – ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS EFEITOS DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SECAGEM NA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS DO BAGAÇO DE MAÇÃ.....	43
2.1 INTRODUÇÃO.....	43
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
2.2.1 Materiais	45
2.2.2 Métodos	45
2.2.2.1 Obtenção do bagaço de maçã	45
2.2.2.2 Secagem do bagaço	46
2.2.2.3 Determinação da cinética de secagem e ajuste por modelos matemáticos.....	47
2.2.2.4 Captação de imagem por microscopia eletrônica de varredura - MEV.....	49
2.2.2.5 Determinação do teor de umidade	49
2.2.2.6 Análise colorimétrica.....	49
2.2.2.7 Extração dos compostos fenólicos.....	50
2.2.2.8 Caracterização dos extratos de compostos fenólicos.....	51
2.2.2.8.1 Determinação dos compostos fenólicos totais - TPC.....	51
2.2.2.8.2 Análise de compostos fenólicos individuais	51
2.2.2.8.3 Determinação de flavonoides - TFC	52
2.2.2.8.4 Determinação da capacidade antioxidante	53
2.2.2.9 Análise estatística	54
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
2.3.1 Comparação das técnicas e cinética de secagem do bagaço de maçã	54
2.3.2 Modelagem matemática e ajuste das curvas de secagem	58
2.3.3 Análise e avaliação de características morfológicas utilizando microscopia eletrônica de varredura - MEV.....	61
2.3.4 Análise das alterações das características visuais e nas coordenadas de cor.....	63
2.3.5 Caracterização dos extratos	65
2.4 CONCLUSÃO.....	69

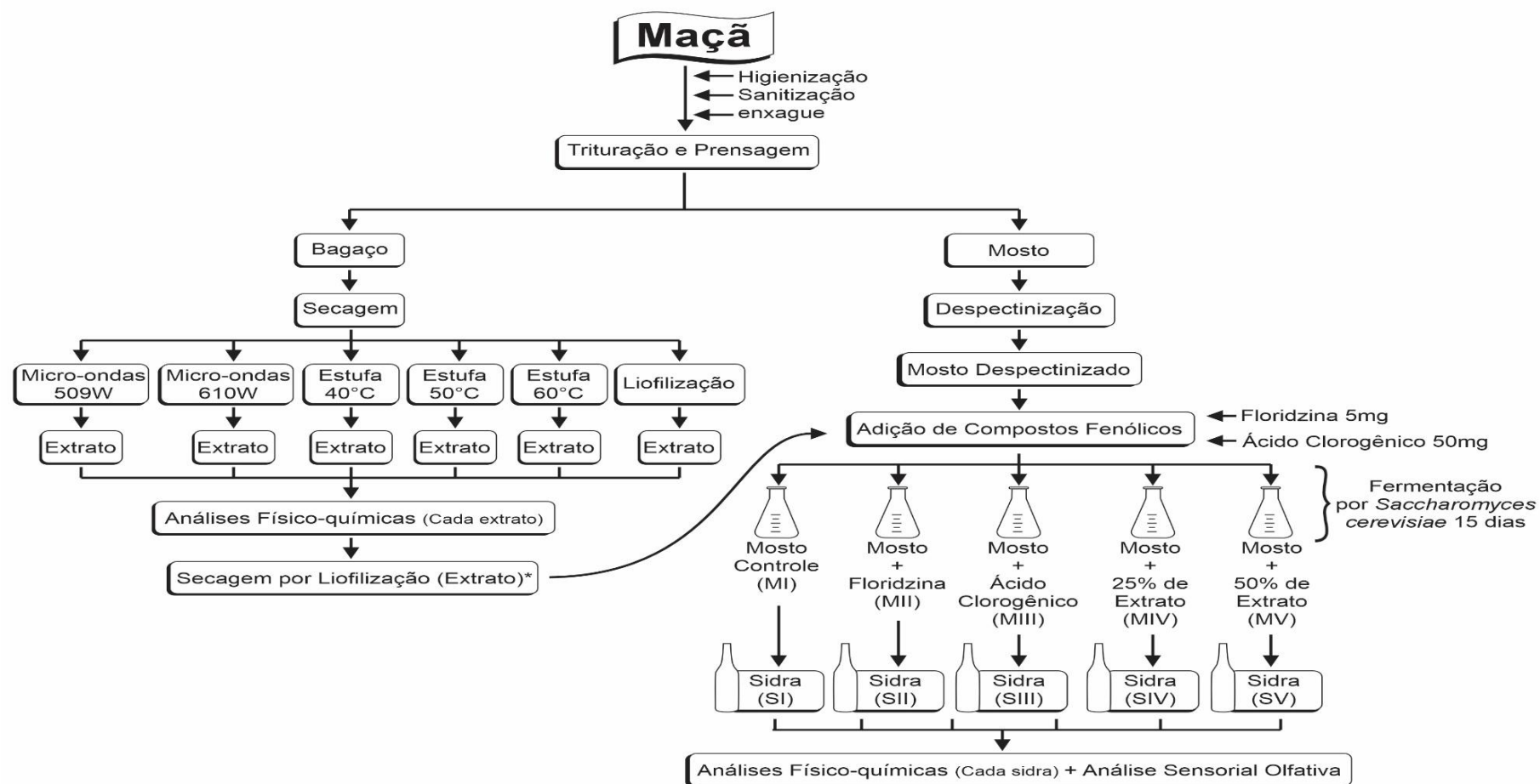
CAPÍTULO 3 – VIABILIDADE DO MOSTO ARTIFICIAL E DOS COMPOSTOS FENÓLICOS NA FERMENTAÇÃO E FORMAÇÃO DE AROMAS EM SIDRA ARTIFICIAIS.....	71
3.1	INTRODUÇÃO.....71
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....73
3.2.1	Materiais73
3.2.2	Métodos74
3.2.2.1	Formulação do mosto artificial.....74
3.2.2.2	Obtenção e secagem do bagaço de maçã.....75
3.2.2.3	Extração de compostos fenólicos75
3.2.2.4	Fermentação do mosto artificial75
3.2.2.5	Cinética da fermentação76
3.2.2.6	Propriedades de cor, caracterização fenólica e antioxidante76
3.2.2.6.1	<i>Análise colorimétrica</i>76
3.2.2.6.2	<i>Determinação dos compostos fenólicos totais - TPC</i>77
3.2.2.6.3	<i>Análise de compostos fenólicos individuais</i>77
3.2.2.6.4	<i>Determinação de flavonoides - TFC</i>78
3.2.2.6.5	<i>Determinação da capacidade antioxidante</i>78
3.2.2.7	Análises dos componentes voláteis de aroma por cromatografia gasosa79
3.2.2.8	Análise estatística80
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO81
3.3.1	Parâmetro cinético da fermentação.....81
3.3.2	Caracterização fenólica e antioxidante das sidras artificiais83
3.3.3	Influência da adição de extratos fenólicos nas propriedades de cor e aroma85
3.4	CONCLUSÃO.....91
CAPÍTULO 4 - EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE EXTRATO FENÓLICO DO BAGAÇO DE MAÇÃ NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E NO PERFIL AROMÁTICO DO MOSTO E SIDRA	93
4.1	INTRODUÇÃO.....94
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....95
4.2.1	Materiais95
4.2.2	Métodos96
4.2.2.1	Obtenção do mosto e bagaço de maçã.....96
4.2.2.2	Secagem do bagaço de maçã96
4.2.2.3	Extração de compostos fenólicos97
4.2.2.4	Processamento do mosto de maçã e fermentação da sidra97
4.2.2.5	Cinética da fermentação98
4.2.2.6	Determinação das concentrações de açúcares98
4.2.2.7	Propriedades de cor e caracterização fenólica e antioxidante99
4.2.2.7.1	<i>Análise colorimétrica</i>99
4.2.2.7.2	<i>Determinação dos compostos fenólicos totais - TPC</i>99
4.2.2.7.3	<i>Análise de compostos fenólicos individuais</i>100
4.2.2.7.4	<i>Determinação de flavonoides - TFC</i>100
4.2.2.7.5	<i>Determinação da capacidade antioxidante</i>101
4.2.2.8	Análises dos componentes de aroma por cromatografia gasosa.....101
4.2.2.9	Análise sensorial olfativa102
4.2.2.10	Análise estatística103
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO104
4.3.1	Parâmetro cinético da fermentação.....104
4.3.2	Caracterização fenólica e antioxidante das sidras e mostos106

4.3.3	Influência da adição de extratos fenólicos nas propriedades de cor e aroma	110
4.3.4	Análise sensorial olfativa	124
4.4	CONCLUSÃO	128
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		129
REFERÊNCIAS		130

APRESENTAÇÃO

Esta tese está de acordo com as diretrizes do *Manual de Normatização Bibliográfica Para Trabalhos Científicos da UEPG (2023)* e foi organizada em quatro capítulos. O primeiro capítulo consiste em uma revisão bibliográfica que aborda os temas pertinentes à pesquisa, como a maçã, seus produtos e subprodutos, técnicas de secagem aplicados no bagaço de maçã, compostos fenólicos, aromas, e a interação entre esses compostos. O segundo capítulo detalha os métodos de secagem aplicados ao bagaço de maçã, discutindo a cinética e os ajustes aos modelos matemáticos semiteóricos, bem como a caracterização físico-química e os efeitos na extração dos compostos fenólicos dos bagaços após a secagem. Destaca-se, também, neste capítulo, a elaboração dos extratos de compostos fenólicos a partir das amostras secas de bagaço de maçã obtidas por diferentes técnicas, bem como a avaliação dos fenólicos totais e da capacidade antioxidante de cada amostra. No terceiro capítulo, desenvolveu-se um mosto artificial fermentado com a adição de compostos fenólicos, com o objetivo de analisar a influência desses compostos na formação do aroma, sem a interferência de outros componentes da matriz alimentar da maçã. No quarto e último capítulo, apresentou-se diversas formulações de bebidas enriquecidas com o extrato fenólico de maior potencial identificado anteriormente, analisando-se a influência desse extrato em suas características aromáticas e fenólica. A estrutura da tese foi organizada para garantir a coerência entre os capítulos e a compreensão progressiva dos resultados. A Figura 1, apresentada a seguir, sintetiza as etapas do estudo, desde a secagem do bagaço de maçã até a formulação das bebidas enriquecidas. Cada capítulo foi elaborado para submissão a periódicos científicos, atuando de forma autônoma, mas. Além disso, a tese inclui uma introdução geral e as considerações finais, que encerraram a obra.

Figura 1 - Diagrama dos processos de secagens do bagaço de maçã para obtenção de extratos e aplicação do extrato mais eficiente no mosto para fermentação da sidra



Fonte: a autora.

Nota: * A liofilização do bagaço mostrou-se o método de secagem mais adequado para esta pesquisa. O extrato do bagaço liofilizado foi então selecionado e adicionado ao mosto.

INTRODUÇÃO

A maçã é um fruto amplamente consumido em todo o mundo, sendo apreciada principalmente *in natura*, mas também presente em diversos produtos, como sucos e sidras. Os seus atributos nutricionais, incluindo vitaminas, minerais e fibras, aliados à presença de compostos bioativos, conferem-lhe relevância na alimentação. Dentre esses compostos, os fenólicos destacam-se por apresentarem propriedades antioxidantes, que promovem benefícios à saúde e contribuem para a melhoria da qualidade dos alimentos, prolongando a durabilidade dos produtos e influenciando características sensoriais, como a cor, o sabor, a adstringência e o aroma. No que se refere ao aroma, sua influência ocorre por meio da interação com os compostos voláteis aromáticos, modificando especialmente sua volatilidade e solubilidade, além de aprimorar sua percepção.

O suco de maçã preserva muitas das propriedades nutricionais da fruta *in natura* e pode ser produzido a partir de frutas que não passaram pelo controle de qualidade para o consumo *in natura*, desde que cumpram os padrões microbiológicos de segurança. Sendo uma fonte de antioxidantes, o suco auxilia no combate aos radicais livres e contribui para a saúde cardiovascular. Além disso, contém vitaminas e, dependendo do método de produção, pode apresentar pequenas quantidades de fibras. Diante das mudanças nos hábitos dos consumidores, a produção de suco surge como uma estratégia eficaz para reduzir o desperdício, diversificar o consumo e agregar valor à cadeia produtiva da maçã.

A sidra, bebida fermentada, derivada do suco ou mosto de maçã, é popular em diversas culturas e pode apresentar ampla variação de sabor, aroma e teor alcoólico. Os principais problemas na produção de sidra frequentemente envolvem o aroma, incluindo a modificação da percepção do sabor devido à interação entre aroma e sabor, a presença de compostos voláteis indesejáveis e influência das leveduras na formação desses compostos. Entre os aromas indesejáveis, destacam-se notas de vinagre, fermento, ácido lático, feno, terra, mofo e pimenta preta, que podem afetar negativamente a qualidade da bebida.

A produção dessas bebidas gera resíduos agroindustriais, como o bagaço de maçã, que é rico em compostos fenólicos e fibras. Esse resíduo, geralmente subutilizado ou descartado, é destinado principalmente à ração animal ou à adubação, o que representa um desafio em termos de sustentabilidade e desperdício de recursos. Considerando seu conteúdo de compostos benéficos à saúde e seu potencial como aditivo alimentar, a valorização do bagaço é uma estratégia importante para o aproveitamento integral dos resíduos, especialmente de seus compostos bioativos. A incorporação desses compostos em bebida pode aprimorar sua

qualidade aromática e sensorial, além de contribuir para a sustentabilidade da cadeia produtiva da maçã.

Para a extração dos compostos fenólicos do bagaço de maçã, é necessário iniciar com um processo de secagem, a fim de garantir a estabilidade microbiológica e química, através da redução da umidade. A técnica de secagem escolhida pode impactar diretamente a composição e a disponibilidade desses compostos, sendo necessária uma análise criteriosa para otimizar a extração dos bioativos. Este estudo teve como objetivo identificar a técnica de secagem mais eficiente para maximizar a extração dos compostos bioativos do bagaço de maçã, avaliar a influência desses compostos na formação de compostos aromáticos em bebida fermentada e, por fim, contribuir para a redução do impacto ambiental da agroindústria da maçã. A maioria dos estudos existentes foca apenas na utilização do bagaço de maçã para fins alimentares ou na preservação de suas propriedades antioxidantes, sendo que pouco se sabe sobre o potencial desses compostos na modulação dos compostos voláteis aromáticos em bebidas fermentadas, como a sidra. Dessa forma, há uma lacuna na literatura quanto ao uso eficaz do bagaço de maçã em bebidas fermentadas, onde a aplicação de extrato de compostos fenólicos pode representar uma inovação no aroma.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Investigar o potencial do bagaço de maçã como fonte de compostos fenólicos, avaliar o impacto de diferentes técnicas de secagem na preservação e extração desses compostos e analisar os efeitos da adição de extratos fenólicos na formação dos compostos voláteis aromáticos no mosto e na bebida fermentada.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar diferentes técnicas de secagem e avaliar seus efeitos na eficiência da extração dos compostos fenólicos do bagaço de maçã.
- Avaliar o mosto artificial como uma alternativa para o estudo das características da fermentação alcoólica e do desenvolvimento dos compostos voláteis aromáticos.
- Incorporar o extrato fenólico desenvolvido em bebidas derivadas de maçã, em diferentes proporções, e avaliar sua influência na formação de compostos voláteis aromáticos nos mostos e nas sidras.
- Incorporar e avaliar o efeito da floridzina e do ácido clorogênico na formação dos compostos aromáticos na sidra.
- Avaliar os compostos fenólicos e a atividade antioxidante dos extratos, mostos e sidras.

CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA

RESUMO

A maçã (*Malus domestica*) teve origem na Ásia Central e é descendente da maçã selvagem *Malus sieversii*, passando por um processo de domesticação ao longo dos séculos até adquirir as características atualmente conhecidas. Trata-se de uma fruta amplamente consumida, com poucas calorias e rica em diversos compostos que promovem benefícios à saúde. Além disso, possui grande potencial para a industrialização, principalmente na produção de sucos e sidras. Junto com os benefícios à saúde, os compostos fenólicos presentes na maçã podem influenciar positivamente as características sensoriais das bebidas, como a cor, o amargor, o aroma e até mesmo a estabilidade oxidativa. Esses compostos desempenham um papel fundamental tanto na aceitação da bebida quanto nos efeitos benéficos à saúde dos consumidores. Os compostos voláteis, responsáveis pelo aroma, podem ser influenciados por diversos fatores, entre os quais se destacam os fenólicos, especialmente por sua capacidade de afetar a volatilidade e a solubilidade dos compostos aromáticos. Para melhorar a qualidade das bebidas, é possível adicionar compostos fenólicos presentes no bagaço de maçã, uma vez que, durante a extração do mosto, a maior parte desses compostos permanece retida nesse subproduto. No entanto, para que a extração seja eficiente e isenta de contaminantes, é necessário submeter o bagaço a um processo de secagem. Esse processo tem como objetivo reduzir o teor de umidade, estabilizar reações enzimáticas e oxidativas que ocorrem no material, além de garantir a segurança microbiológica. A secagem pode ser realizada por diferentes técnicas, que vão desde técnicas naturais, como a secagem solar, até técnicas artificiais, como a secagem por ar quente, micro-ondas e liofilização. Cada técnica apresenta vantagens e desvantagens, e a escolha depende das características desejadas para o produto desidratado, especialmente no que diz respeito à preservação dos compostos bioativos. Esta revisão destaca a importância da maçã e de seus subprodutos com ênfase nos compostos fenólicos e na formação do aroma, buscando compreender a influência dos polifenóis no perfil aromático das bebidas.

Palavras-chave: Maçã Gala. Compostos fenólicos. Aromas. Secagem. Subprodutos.

1.1 INTRODUÇÃO

A revisão bibliográfica estabelece o estado da arte da pesquisa, enfatizando a importância da maçã e seu subproduto, o bagaço, tanto em termos nutricionais quanto funcionais, com destaque para os compostos fenólicos. A maçã sobressai-se não apenas pela sua relevância na alimentação e pelos benefícios que proporciona à saúde, mas também por suas características físico-químicas, que a tornam uma matéria-prima versátil e de grande interesse para a indústria de alimentos (Josimuddin; Kumar; Rastogi, 2022; Millán-Laleona *et al.*, 2023). Com uma composição rica em fibras, vitaminas, minerais e compostos bioativos, a maçã possui grande potencial para o desenvolvimento de produtos alimentícios de alto valor agregado (Josimuddin; Kumar; Rastogi, 2022; Millán-Laleona *et al.*, 2023).

Entre os principais produtos derivados do processamento da maçã, destacam-se o suco e a sidra, que, além de representarem alternativas para diversificar o consumo da fruta, contribuem para o aproveitamento de maçãs que não são aceitas pelo consumidor devido a imperfeições ou outros fatores (La Peña-Armada; Mateos-Aparicio, 2022; Simões; Waszczynskyj; Wosiacki, 2009).

Durante o processamento, entre 20% e 40% do peso da fruta fica retido no bagaço, um subproduto composto por cascas, polpa e sementes (Nogueira *et al.*, 2005; Skinner *et al.*, 2018). Embora muitas vezes subaproveitado ou descartado, o bagaço de maçã apresenta elevado teor de compostos bioativos, como os fenóis, que possuem propriedades antioxidantes e contribuem para a estabilidade e a qualidade sensorial aromática de alimentos (Grispoldi *et al.*, 2022; Kruczek *et al.*, 2023), tornando-se um recurso importante para o desenvolvimento e enriquecimento de alimentos e bebidas.

Para viabilizar a utilização desses subprodutos, é necessário aplicar técnicas de secagem com o objetivo de reduzir o teor de umidade, assegurando a estabilidade microbiológica e enzimática (Petikirige; Karim; Millar, 2022; Tulej; Głowacki, 2022). No entanto, cada técnica de secagem pode impactar a composição fenólica do bagaço, o que torna necessária uma análise detalhada para identificar a técnica mais adequada para a preservação desses compostos bioativos (Petikirige; Karim; Millar, 2022). Diversas técnicas podem ser utilizadas, como secagem em estufa de circulação de ar quente, liofilização, secagem a vácuo e secagem por micro-ondas.

Esta revisão busca fornecer uma base teórica abrangente sobre a maçã, seus produtos e subprodutos, como suco, sidra e bagaço, explorando sua composição e características funcionais. Com foco na importância dos compostos fenólicos para a saúde, investiga-se como esses componentes influenciam na qualidade do perfil volátil aromático de bebidas. Além disso, são discutidos os compostos voláteis e sua relação com as características aromáticas das bebidas. Por fim, também se explora a relevância dos processos de secagem na preservação de compostos bioativos presentes nos alimentos, ressaltando a importância desses compostos.

1.2 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada entre outubro de 2021 e outubro de 2024. Foram selecionados artigos publicados em periódicos de referência relacionados aos temas abordados, os quais foram analisados com o objetivo de identificar características relevantes ao estudo, consolidar

as questões atuais sobre os assuntos e levantar possíveis lacunas na área de conhecimento. Alguns dos critérios utilizados durante a pesquisa foram:

- Definição de palavras-chave: foram selecionados alguns termos relevantes para a busca, como “maçã”; “maçã gala”, “produção”, “subprodutos da maçã”, “resíduos da maçã”, “bagaço”, “bagaço de maçã”, “suco de maçã”, “mosto de maçã”, “sidra”, “técnicas de secagem”, “secagem”, “secagem de alimentos”, “metodologia de secagem de frutas”, “compostos bioativos”, “compostos fenólicos”, “aromas”, entre outros termos relacionados aos temas centrais.

- Seleção de bases de dados: Foram utilizadas bases científicas, como *Scopus*, *Web of Science*, *JCR – Journal Citation Reports*, *ScienceDirect*.

- Critérios de inclusão e exclusão: trabalhos que discutem a influência dos compostos fenólicos na saúde e no perfil sensorial de bebidas; estudos que abordam processos de secagem, com ênfase na preservação de compostos bioativos; estudos focados na formação de compostos voláteis e perfil aromático de bebidas fermentadas; relatórios obtidos de bases de dados de fontes governamentais, como IBGE e FAO, que fornecem dados estatísticos e informações relevantes sobre a produção de maçã; estudos que analisam compostos fenólicos e voláteis em bebidas; artigos publicados a partir de 2000; estudos publicados em inglês e português.

1.3 RESULTADOS DA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

1.3.1 Maçã

As maçãs são pertencentes à classe *Magnoliopsida*, da família *Rosaceae* e ao gênero *Malus* (Perazzolli *et al.*, 2014). São caracterizadas como frutas do tipo pomo, possuindo um núcleo central contendo cinco sementes encapsuladas, envoltas por uma polpa densa, saborosa e comestível (Podse *et al.*, 2000). Apesar da macieira ser uma planta típica de regiões com clima mais frio, algumas variedades se adaptaram à região Sul do Brasil, pois apresentam condições climáticas favoráveis ao seu cultivo; mas é necessário um período de dormência adequado para que ocorra uma brotação e floração uniformes, atendendo as necessidades fisiológicas da planta (Hawerth; Nachtigall, 2016). A macieira da cultivar Gala necessita de no mínimo 600 horas abaixo de 7,2 °C para promover um desenvolvimento de qualidade, além de reduzir o tempo de dormência e acelerar a brotação (Cardoso *et al.*, 2015; Petri *et al.*, 2011).

O cultivo de *Malus domestica* está relacionado ao seu progenitor, *Malus sieversii*, a maçã selvagem nativa da Ásia Central (Davies *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2022). Ao longo dos

séculos, a maçã selvagem passou por um processo de domesticação e seleção, resultando em frutas com melhores características sensoriais, maior concentração de compostos fenólicos, mais pesadas e maiores (Davies *et al.*, 2022). A maçã Gala (*Malus domestica* cv. Gala), ilustrada na Figura 1.1, por exemplo, tem como ancestrais as maçãs selvagens *Malus sieversii* e *Malus sylvestris* e é hoje uma das variedades mais cultivadas no mundo (Sun *et al.*, 2020). Essa cultivar apresenta características como a coloração vermelho-amarelada da casca, forma arredondada com base cônica, sabor doce com leve acidez, além de firmeza, suculência e aroma agradável, sendo o éster um dos compostos responsáveis por esse aroma (Sun *et al.*, 2020). Além da variedade Gala, são conhecidas mais de 7.500 variedades de maçãs, que se diferenciam em diversos aspectos, como tamanho, formato, cor, firmeza, crocância, textura, suculência, teor de compostos bioativos, teor de açúcar e valor nutricional, refletindo a rica biodiversidade dessa fruta (Bhatti; Jha, 2010).

Figura 1.1 - Imagens da maçã Gala



Fonte: A autora

Nota: imagens de maçã Gala; (a) maçã inteira vista lateral; (b) corte longitudinal; (c) maçã inteira vista superior; (d) corte transversal.

Sua disseminação global começou no Oriente Médio e na Europa, sendo introduzida nas Américas por colonizadores europeus (Tian *et al.*, 2022). No Brasil, as primeiras macieiras foram trazidas por imigrantes no início da década de 1960, inicialmente para o cultivo caseiro (Fioravanço; Silveira, 2013). A produção comercial teve início em 1969, incentivada pelo governo federal visando à diminuição da dependência do mercado externo (Fioravanço; Silveira, 2013), consolidando-se no Sul do país em 1989 (Klanovicz, 2010). As cultivares Gala e Fuji, e seus respectivos clones, dominam a produção, representando mais de 90% do total cultivado (Petri *et al.*, 2011). Outras variedades que também são cultivadas no país são: Eva, Daiane e Monalisa (Petri *et al.*, 2011).

Entre os clones da Gala, destacam-se a *Royal Gala*, *Imperial Gala*, *Galaxy*, *Maxi Gala* e *Baigent*, com cores avermelhadas mais intensas, tornando-as mais atraente ao consumidor, enquanto os clones da Fuji, como *Fuji Suprema*, *Fuji precoce*, *Mishima* e *Kiku*, são valorizados

por sua suculência e sabor mais doce (Kvitschal *et al.*, 2013). O desenvolvimento de clones das cultivares de maçã ocorre normalmente por meio da técnica de enxertia, e sua principal função é o aprimoramento na qualidade e sabor, mas mantendo as demais características da variedade da fruta (Kvitschal *et al.*, 2013).

A principal forma de consumo da fruta é *in natura*, mas ela é um recurso promissor para produção de doces, geleias, compotas, sucos, vinagre, sidra, vinho, chips, chás, alimentos infantis e iogurtes (Fioravanço; Silveira, 2013).

No capítulo “Sidra”, de autoria de Nogueira e Wosiacki (2010) é explicado que as maçãs que não atendem aos padrões estéticos e dimensionais para comercialização como fruta *in natura* são classificadas como "industriais". Embora essas maçãs mantenham a composição físico-químicas, perfil sensorial, aromático e segurança microbiológica das maçãs vendidas para consumo *in natura*, elas são destinadas para à fabricação de produtos derivados de maçã, como a sidra e outros produtos processados (Nogueira; Wosiacki, 2010).

O consumo da maçã traz benefícios à saúde amplamente reconhecidos, e muitos são comprovados cientificamente. No entanto, esses benefícios dependem da quantidade e da eficácia dos compostos fitoquímicos e fitonutrientes presentes na fruta, que podem variar dependendo da cultivar, estágio de maturação, condições de colheita e método de armazenamento e processamento (Boyer; Liu, 2004; Feng *et al.*, 2021). Sendo o processamento uma etapa crítica, pode ocorrer a redução de compostos bioativos e de nutrientes (Boyer; Liu, 2004; Skinner *et al.*, 2018). Portanto, é essencial buscar técnicas de processamento que preservem ao máximo essas propriedades.

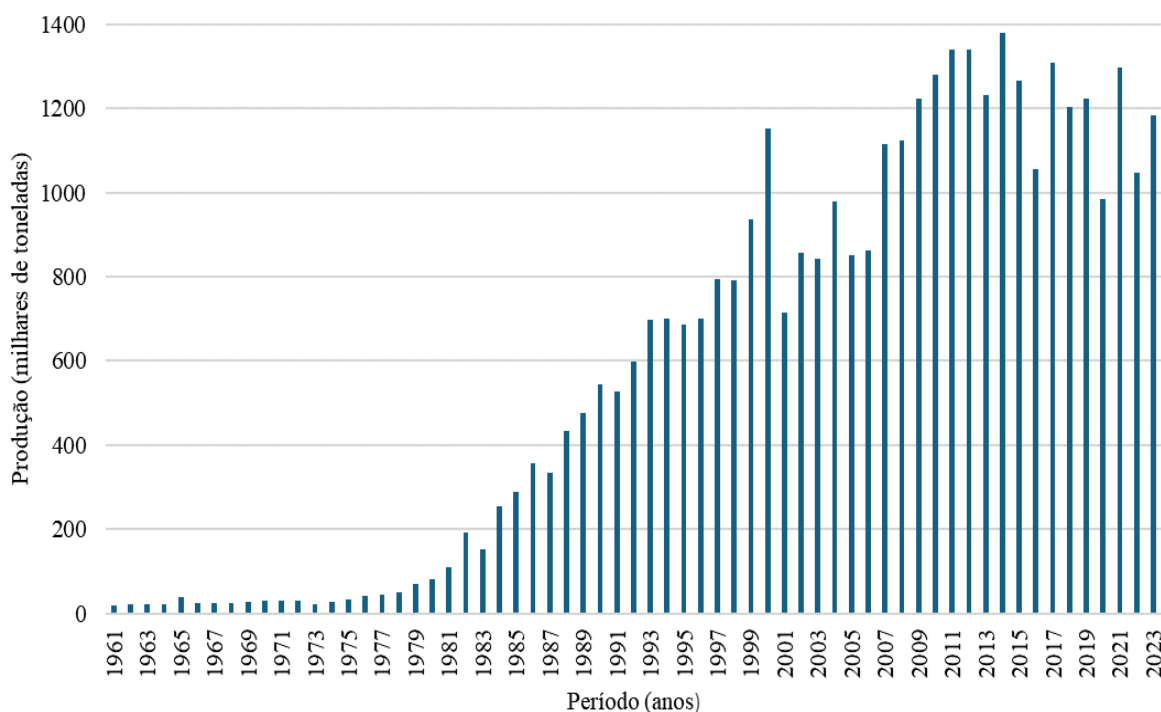
1.3.1.1 Produção de maçã

A produção comercial de maçãs no Brasil se estabeleceu em meados de 1969, com as primeiras plantações concentradas nas regiões Sulistas, principalmente nos municípios catarinenses de Fraiburgo e São Joaquim, além do município gaúcho de Vacaria (Klanovicz, 2010). Com o decorrer do tempo, outras regiões, como o Paraná e São Paulo, começaram a investir em macieiras (Landau; Silva, 2020). Em 2023, São Joaquim – SC destacou-se como o maior produtor de maçãs do Brasil. Em todo o Estado de Santa Catarina foram produzidas mais de 590 mil toneladas, correspondendo a mais da metade da produção total de maçãs no Brasil (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024). Já no Estado do Paraná, a produção foi de um pouco mais de 26 mil toneladas, sendo o Município de Palmas o maior produtor do Estado (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024).

Quanto à extensão de área cultivada, o Brasil registrou mais de 33 mil hectares em 2023, alcançando uma produção total superior a 1 milhão de toneladas, e correspondendo em média 35.488 kg por hectare, ficando em 15º lugar entre os maiores produtores mundiais de maçã (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024; IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024). Mundialmente, a colheita de maçãs ultrapassou 95 milhões de toneladas em 2022, e somente a China contribuiu com quase 50% dessa produção, sendo, assim, o maior produtor de maçãs (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024).

O gráfico 1.1 ilustra a evolução da produção de maçãs no Brasil ao longo dos anos, destacando um crescimento contínuo desde o início do cultivo, com pequenas variações na produção entre os anos 2017 e 2021. Mas, de acordo com o último Anuário Brasileiro da Maçã (2019), apesar da queda no quantitativo colhido em 2019, observou-se uma melhora significativa na qualidade das maçãs brasileiras, com frutos de maior tamanho, menor incidência de danos e características sensoriais mais atraentes, como coloração e sabor mais intensos (Kist *et al.*, 2019).

Gráfico 1.1 - Produção de maçãs no Brasil



Fonte: Adaptado: FAO - FAOSTAT (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>) e INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/maca/br>).

1.3.1.2 Características nutricionais e funcionais da maçã

A maçã é amplamente reconhecida por suas características sensoriais agradáveis, seu perfil nutricional e propriedades medicinais (Patocka *et al.*, 2020). Além de ser uma fruta de baixo valor calórico, destaca-se pelos seus compostos bioativos, especialmente os compostos fenólicos, o que a torna uma escolha saudável e desejável para os consumidores (Feng *et al.*, 2021; Kaeswurm *et al.*, 2023).

A Tabela 1.1 é uma ferramenta informativa, que demonstra um panorama geral da composição nutricional tanto da maçã quanto do seu bagaço, facilitando a compreensão de alguns dos benefícios nutricionais dessa fruta. Tanto a maçã quanto o seu bagaço são ricos em fibras, essenciais para a saúde e regulação intestinal. A pectina, fibra solúvel abundante na casca, reduz a absorção de gorduras, formando um gel que as encapsula durante a digestão (Skinner *et al.*, 2018). Além disso, a alta quantidade de água na maçã auxilia na hidratação corporal (Skinner *et al.*, 2018). Outro destaque da maçã é o zinco, mesmo em quantidades traço, esse mineral é essencial para a constituição dos ácidos nucleicos e, além de ser reconhecido cientificamente como auxiliar da memória e do desenvolvimento do hipocampo em crianças (Patocka *et al.*, 2020). Diversos outros estudos relatam benefícios da maçã de seus subprodutos ao organismo humano (Feng *et al.*, 2021; Kaeswurm *et al.*, 2023).

Tabela 1.1- Composição nutricional da maçã com casca *in natura* e do bagaço de maçã

Componente	Maçã <i>in natura</i> (100 g)*	Bagaço de maçã (100 g)**
Energia	64 kcal	199 kcal
Carboidrato	15,7 g	44,5-57,4 g
Proteína	0,3 g	2,7-5,3 g
Lipídio	0,5 g	1,1-3,6 g
Fibras	2,1 g	4,4 - 47,3 g
Cálcio	7,1 mg	55,6-92,7mg
Ferro	0,1 mg	Tr
Sódio	0,7 mg	185,3 mg
Zinco	Tr	Tr
Magnésio	15,3 mg	18,5-333,5
Fósforo	21,0 mg	-
Potássio	418 mg	398,4-880,2 mg
Selênio	0,1 mg	-
Vitamina A (RE)	7,0 mcg	-
Vitamina A (RAE)	3,5 mcg	-
Alfa - tocoferol	0,5 mg	-
Vitamina C	2,0 mg	-
Equivalente de folato	3,5 mcg	-

Fonte: Adaptado: *Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA). Universidade de São Paulo (USP). Food Research Center (FoRC). Versão 7.2. São Paulo, 2023. Disponível em: <http://www.fcf.usp.br/tbca> e **Skinner *et al.* A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace. *Nutrition reviews*, v. 76, n. 12, p. 893–909, 2018.

Os compostos fenólicos são os principais compostos bioativos das plantas (Li, Y. *et al.*, 2020). Eles são metabólitos secundários, cuja principal via de biossíntese é a do ácido chiquímico (Li, Y. *et al.*, 2020). A composição e a quantidade desses compostos estão relacionadas ao estresse ambiental e ao crescimento da planta, pois sua principal função é a proteção da planta (Li, Y. *et al.*, 2020; Ramakrishna; Ravishankar, 2011). Os aminoácidos são os principais precursores desses compostos, principalmente a fenilalanina e a tirosina (Tzin; Galili, 2010). Os fenólicos desempenham diversas funções importantes nas plantas, desde a adaptação no ambiente, defesa, cor e sabor, além de trazer benefícios à saúde de quem os consome, pois apresentam propriedades antioxidantes, assim como atividades biológicas e farmacológicas (Kumar; Goel, 2019; Li, Y. *et al.*, 2020). Eles também podem ser utilizados para melhorar a qualidade dos alimentos, suas propriedades aromáticas, sensoriais e antioxidantes (Kumar; Goel, 2019), podendo ser potenciais substitutos naturais para diversos aditivos químicos.

Os principais compostos fenólicos da maçã são: ácido clorogênico, catequina, epicatequina, procianidina B2 e a floridzina (Feng *et al.*, 2021). A classificação desses compostos, mais presentes nas maçãs, baseada em suas estruturas químicas é apresentada na Tabela 1.2. Normalmente, o epicarpo da maçã é a parte que contém a maior concentração de compostos fenólicos. Na cultivar Gala, os compostos mais presentes são a quercetina, epicatequina, catequina, procianidinas, floridzina, ácido p-cumárico e ácido cafeico (Alberti *et al.*, 2017; Arnold; Gramza-Michalowska, 2023; Zardo *et al.*, 2009). Esses compostos podem se apresentar na forma livre ou ligados a açúcares (glicosídeos) ou proteínas (Alberti *et al.*, 2017). A concentração e a atividade desses compostos fenólicos variam de acordo com fatores como estágio de maturação, a variedade, o tipo de tecido vegetal (epicarpo, mesocarpo ou endocarpo), as condições climáticas, o cultivo e até a matriz alimentar (Alberti *et al.*, 2017; Feng *et al.*, 2021). Por exemplo, na pesquisa de Podse *et al.* (2000), o teor desses compostos variou de 2200 mg/kg na variedade ‘close’ a 3570 mg/kg na variedade ‘booskoop’.

Pesquisas, como o estudo de Bondonno *et al.* (2017), têm ressaltado os benefícios dos compostos fenólicos da maçã à saúde humana, incluindo a prevenção de doenças cardiovasculares, a melhora da função vascular, a redução da pressão arterial, a regulação dos lipídios sanguíneos, o controle da hiperglicemia e a diminuição de processos inflamatórios.

Tabela 1.2 - Descrição dos principais compostos fenólicos encontrados na maçã

(continua)			
Subclasses	Subclasses específicas	Descrição	Compostos
Ácidos Fenólicos	Ácidos hidroxibenzoicos	Apresentam um anel aromático com 7 átomos de carbono ($C_6 - C_1$) e são derivados do ácido benzoico. São taninos hidrossolúveis e se apresentam em quantidades mínimas na maçã, normalmente em traços. Esses compostos são responsáveis por algumas características sensoriais de alguns alimentos, além de ser responsável por vários benefícios a saúde.	ácido gálico, ácido salicílico, ácido vanílico, p-hidroxibenzóico
	Ácidos Hidroxicinâmicos	Contêm 9 átomos de carbono ($C_6 - C_3$). Os mais comuns são os ácidos <i>p</i> -cumárico e caféico, que normalmente estão esterificados com o ácido quínico, formando compostos como <i>p</i> -cumaroilquínico e o ácido clorogênico. O ácido clorogênico é o mais presente na maçã e normalmente é o menos afetado no processo de extração do suco.	ácidos <i>p</i> -cumárico, caféico, ácido clorogênico
	Antocianinas	São responsáveis pela coloração de muitas plantas, variando do vermelho ao violeta/azul, dependendo do pH. São solúveis em água e instáveis a altas temperaturas. Atuam na proteção das plantas contra danos causados pela luz ultravioleta, regulando a fotossíntese, além de ser responsável pela atração de polinizadores e dispersores de sementes.	
Flavonoides	Flavonóis	Apresentam um papel de defesa da planta com respostas ao estresse e proteção UV. Exibem uma cor amarelada, são solúveis em lipídeos e em álcool, mas insolúveis em água quente e praticamente insolúveis em água fria. Destacam-se por suas atividades farmacológicas e antioxidantes, mas devido a sua baixa biodisponibilidade e instabilidade dificulta a sua aplicação farmacológica.	Quercetina
	Dihidrochalconas	Estão presentes em determinadas frutas, como as maçãs e peras. Tem grande potencial benéficos a saúde e apresentam um sabor doce, sendo utilizadas como adoçantes naturais. A floridzina e a floretina são as principais representantes dessa classe, são compostos de baixa solubilidade e biodisponibilidade, dificultando a sua utilização. A floridzina é um biomarcador específico para produtos de maçã, pois é encontrado em grande quantidade, principalmente no endocarpo e epicarpo, enquanto em outras espécies esse composto aparece em pequenas quantidades, assim tornando-se útil para detectar a presença de maçã em diversos produtos alimentícios, principalmente em produtos que sofreram fraudes. Ela apresenta resistência contra vários patógenos na fruta, além de apresentar potencial ação de atividades anti-inflamatórias e possíveis efeitos de proteção cardiovascular. Enquanto a florentina está presente em diversas partes da macieira e não somente na fruta e apresenta ação antimicrobiana.	Floridzina, florentina

Tabela 1.2 - Descrição dos principais compostos fenólicos encontrados na maçã

(conclusão)			
Subclasses	Subclasses específicas	Descrição	Compostos
	Flavan-3-óis (flavanóis)	Conhecidos como benzopiranos, incluem compostos como catequina, epicatequina e procianidinas, que representam cerca de 60% dos compostos fenólicos totais presentes na maçã. Estão distribuídos no mesocarpo e epicarpo em formas monoméricas e poliméricas. Eles influenciam características como adstringência, amargor, doçura, acidez, viscosidade salivar, cor e aroma. A sensação de adstringência, é a principal alteração ocasionada por este composto, resultante da interação desses compostos com proteínas ricas em prolina na boca. A biodisponibilidade desses compostos está relacionada ao grau de polimerização, sendo os monômeros absorvidos mais rapidamente no intestino delgado, enquanto os oligômeros e polímeros dependem da ação da microbiota intestinal para serem absorvidos.	Epicatequina, procianidinas B1 e B2.

Fonte: Adaptado: GARRIDO, J.; BORGES, F. Wine and grape polyphenols - A chemical perspective. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1844–1858, dez. 2013; LEE, J.; CHAN, B. L. S.; MITCHELL, A. E. Identification/quantification of free and bound phenolic acids in peel and pulp of apples (*Malus domestica*) using high resolution mass spectrometry (HRMS). **Food Chemistry**, v. 215, p. 301–310, 15 jan. 2017; LI, Z. *et al.* A comprehensive review on phytochemistry, bioactivities, toxicity studies, and clinical studies on *Ficus carica* Linn. leaves. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 137, n. 137, 2021; ALBERTI, *et al.* Impact on chemical profile in apple juice and cider made from unripe, ripe and senescent dessert varieties. **LWT**, v. 65, p. 436–443, 2016; VERDU, C. F. *et al.* Polyphenol variability in the fruits and juices of a cider apple progeny. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 7, p. 1305–1314, 2014; LIU, W. *et al.* The flavonoid biosynthesis network in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 23, 26 nov. 2021; FREITAS, V. O mundo colorido das antocianinas. **Revista de Ciência Elementar**, v. 7, n. 2, 30 jun. 2019; SILVA, P. F. *et al.* Photoprotection and the photophysics of acylated anthocyanins. **Chemistry - A European Journal**, v. 18, n. 12, p. 3736–3744, 19 mar. 2012; BATIHA, G. E.-S. *et al.* The pharmacological activity, biochemical properties, and pharmacokinetics of the major natural polyphenolic flavonoid: Quercetin. **Foods**, v. 9, n. 374, 2020.; XU, D. *et al.* Antioxidant activities of quercetin and its complexes for medicinal application. **Molecules**, v. 24, n. 6, 21 mar. 2019; GOSCH, C.; HALBWIRTH, H.; STICH, K. Phloridzin: Biosynthesis, distribution and physiological relevance in plants. **Phytochemistry**, v. 71, n. 8–9, p. 838–843, 29 mar. 2010; STOMPOR, M.; BRODA, D.; BAJEK-BIL, A. Dihydrochalcones: Methods of acquisition and pharmacological properties - A first systematic review. **Molecules**, v. 24, 2019; ALBERTI, *et al.* Distribution of phenolic compounds and antioxidant capacity in apples tissues during ripening. **Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 6, p. 1511–1518, 1 maio 2017; ARON, P. M.; KENNEDY, J. A. Flavan-3-ols: Nature, occurrence and biological activity. **Molecular Nutrition and Food Research**, v. 52, n. 1, p. 79–104, jan. 2008; MENA, P. *et al.* Flavan-3-ols, anthocyanins, and inflammation. **IUBMB Life**, v. 66, n. 11, p. 745–758, 2014.

Os compostos fenólicos, como os flavonoides, contribuem para a redução da pressão arterial e na prevenção de doenças cardiovasculares (Marhuenda *et al.*, 2019). Para além de seus benefícios à saúde, esses polifenóis também influenciam o aroma dos alimentos e bebidas; e uma de suas ações ocorre alterando a volatilidade dos compostos aromáticos e, conseqüentemente, as características físico-químicas dos produtos (Guo; Yue; Yuan, 2019). Sua atuação abrange a formação de cor, amargor, aroma e adstringência, além da contribuição para a estabilidade oxidativa e o combate aos radicais livres (Verdu *et al.*, 2014).

Esses compostos desempenham um papel importante na qualidade da sidra e de outras bebidas, influenciando atributos sensoriais como cor, adstringência, amargor, aroma, acidez e turbidez (Benvenuti *et al.*, 2019; Sobczak *et al.*, 2022; Verdu *et al.*, 2014; Way *et al.*, 2020). Entretanto, etapas de processamento, tais como pré-fermentação, centrifugação e oxigenação, podem reduzir sua concentração, comprometendo a qualidade final do produto (Guiné *et al.*, 2021). Embora sua alta reatividade impõe desafios para a pesquisa, a importância dos compostos fenólicos, tanto para a aceitabilidade dos produtos quanto para os benefícios à saúde dos consumidores, é inquestionável (Lewandowska *et al.*, 2013). Portanto, compreender sua influência na formação de aromas é fundamental para a produção e desenvolvimento de bebidas com qualidade aromática superior.

1.3.1.3 Produtos e subprodutos de maçã

A industrialização da maçã no Brasil ainda é limitada, principalmente pela preferência do consumidor pela fruta fresca (Monteiro; Brito; Bronze, 2023). Estima-se que apenas 20% da colheita seja destinada à indústria (Monteiro; Brito; Bronze, 2023). Outro fator importante que interfere nessa industrialização é a preferência do consumidor pelas variedades Fuji e Gala (Wosiacki; Pholman; Nogueira, 2004), que, por sua vez, são as mais cultivadas. No entanto, essas variedades apresentam teores mais baixos de compostos fenólicos e acidez total titulável, tornando-as menos adequadas para o processamento de sucos e sidras, quando comparadas a outras variedades voltadas a industrialização (Nogueira *et al.*, 2019; Wosiacki; Pholman; Nogueira, 2004).

As maçãs destinadas ao processamento geralmente são aquelas que apresentam defeitos fisiológicos, morfológicos ou fitossanitários, desde que não afetem a segurança dos alimentos, visando agregar valor à cadeia produtiva e reduzir desperdícios (Nogueira *et al.*, 2019; Nogueira; Wosiacki, 2012). Entre os produtos derivados da maçã, destacam-se sucos

integrais, bebidas fermentadas, sidra, vinagre, destilados, licores, maçãs desidratadas, geleias e doces (Nogueira *et al.*, 2019).

Durante o processamento, a maçã é separada em mosto e resíduo (Figura 1.2). De acordo com Wilczyński, Kobus e Dzik (2019), o rendimento do mosto pode atingir aproximadamente 72% do peso total da fruta processada, variando conforme a cultivar e o método de extração utilizado. O resíduo, conhecido como bagaço de maçã, pode representar cerca de 25% do peso total (Skinner *et al.*, 2018). O descarte inadequado desse resíduo gera sérios problemas de saúde pública, devido à sua fácil fermentação e consequente poluição ambiental, tornando o descarte adequado complexo e oneroso (Dhillon; Kaur; Brar, 2013; Madrera; Bedriñana; Valles, 2015). O aproveitamento do bagaço para consumo humano é uma solução ecologicamente sustentável, benéfica à saúde e que promove a economia circular (Barreira; Arraibi; Ferreira, 2019; Skinner *et al.*, 2018). Por ser rico em fibras, ácidos graxos essenciais, compostos bioativos e diversos nutrientes, o seu consumo pode melhorar o metabolismo lipídico, a capacidade antioxidante e a saúde digestiva (Skinner *et al.*, 2018).

No entanto, no Brasil, o consumo de sucos, sidras ou outros produtos à base de maçã ainda não está consolidado, limitando o número de indústrias especializadas (Nogueira *et al.*, 2019). A transformação de maçãs que não atendem aos padrões de venda fresca em sucos e ou outros derivados representa uma alternativa viável para agregar valor, reduzir o desperdício e oferecer produtos nutritivos, saborosos e benéficos à saúde, aproveitando ao máximo as qualidades da fruta (Lazzarotto; Girardi; Zandoná, 2016; Li, Q. *et al.*, 2023; Rizzon; Bernardi; Miele, 2005). Assim, o estímulo ao desenvolvimento desse setor é fundamental para ampliar o aproveitamento da produção de maçãs, indo além do consumo *in natura*.

Suco

O suco se destaca como uma forma eficiente e promissora de aproveitar a produção frutífera, facilitando o transporte e a conservação em comparação a fruta *in natura* (Li, Q. *et al.*, 2023). Sua produção minimiza os efeitos da sazonalidade no consumo (Li, Q. *et al.*, 2023). De acordo com a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, suco ou sumo é definido como uma bebida não fermentada, elaborada a partir de frutas ou partes comestíveis de vegetais. A legislação proíbe aditivos artificiais, permitindo apenas a adição de açúcar, limitada a 10% do peso total. O suco deve preservar as propriedades nutricionais, sensoriais e a identidade do ingrediente original, garantindo ao consumidor um produto de qualidade, com características semelhantes à fruta *in natura* (Brasil, 1994).

A produção do suco inicia-se com a seleção das frutas, descartando as inadequadas (Lazzarotto; Girardi; Zandoná, 2016). Após a higienização e lavagem, ocorre a moagem e prensagem, separando o mosto do bagaço. Em seguida, são realizadas a filtração e a inativação enzimática para evitar alterações indesejáveis e reduzir a carga. O processo final inclui aquecimento a 85 °C por 15 segundos, clarificação, pasteurização e envase (Lazzarotto; Girardi; Zandoná, 2016). Contudo, essas etapas podem levar à perda de alguns compostos voláteis (Kebede *et al.*, 2018). Outra desvantagem, em comparação com a fruta fresca, é que uma porção significativa dos compostos fenólicos fica retida no bagaço, enquanto outra parte é perdida durante a fase de clarificação e processamento térmico (Li, Q. *et al.*, 2023). Logo, a recuperação desses compostos durante o processamento requer estudos.

Sidra

A sidra, umas das bebidas alcoólicas mais antigas do mundo, é amplamente consumida na Europa e Reino Unido, onde mais da metade da produção de maçãs se destinada à sua fabricação, utilizando cultivares específicas para esse fim (Ranzan *et al.*, 2024). No Brasil, a sidra é consumida tradicionalmente no fim de ano. Seu consumo esporádico, no entanto, leva à utilização de variedades de maçã de mesa, em vez de cultivares específicas para a elaboração de sidra, podendo resultar em características indesejáveis, como amargor e adstringência (Nogueira *et al.*, 2019). As sidras brasileiras, quando comparadas às francesas, apresentam qualidade inferior e necessitam de aprimoramento (Ranzan *et al.*, 2024). Diante disso, pesquisas estão em andamento com objetivo de aprimorar a qualidade da bebida.

O processo de fabricação da sidra ocorre a partir da fermentação do mosto de maçã, que pode ser produzido com variedades de mesa, industriais ou até uma mistura das duas (Santos *et al.*, 2018). No Brasil, a sidra é regulamentada de acordo com a legislação vigentes sobre o assunto. O Decreto nº 6.871, de 4 de junho de 2009 (Brasil, 2009), define sidra como:

Bebida com graduação alcoólica de quatro a oito por cento em volume, a vinte graus Celsius, obtida pela fermentação alcoólica do mosto de maçã fresca, sã e madura, do suco concentrado de maçã ou ambos, com ou sem a adição de água. Poderá ser gaseificada, sendo proibida a denominação sidra-champanha, espumante ou expressão semelhante. Poderá ser desalcoolizada por meio de processo tecnológico adequado e, neste caso, deverá ser denominada de Sidra sem álcool, desde que o teor alcoólico seja menor ou igual a meio por cento em volume. Pode ser adicionada de açúcares, somente para adoçamento, e de outros aditivos.

O processo de elaboração da sidra inicia-se com a extração do mosto da maçã, seguida da adição de enzimas pectinolíticas para a hidrólise das pectinas e sua sedimentação (Figura 1.2), facilitando a clarificação do mosto (Nogueira e Wosiacki, 2010). Em seguida, o mosto

passa por um processo de trasfega e inicia-se a etapa de fermentação, um processo complexo que transforma em etanol, além da formação de compostos secundários (Daccache, Al *et al.*, 2020). Essa fermentação pode ocorrer de forma espontânea, devido a leveduras presentes na matéria-prima, ou conduzida pela inoculação de leveduras selecionadas, secas e ativas, garantindo maior controle e a produção de compostos aromáticos de melhor qualidade (Lazzarotto *et al.*, 2012; Nogueira e Wosiacki, 2010).

Figura 1.2 - Fotos do bagaço e mosto de maçã após o processamento



Fonte: A autora

Nota: **a)** bagaço de maçã gala; **b)** mosto na fase de despectinação; e **c)** mosto envasado.

A fermentação compreende dois estágios com funções específicas: a alcoólica e a malolática. A fermentação alcoólica, por sua vez, divide-se em duas fases. Inicialmente, uma fase oxidativa, sob condições de baixo nível fermentativo e presença de oxigênio, gerando aromas frutados e inicia a conversão dos açúcares em etanol (Daccache *et al.*, 2020; Nogueira e Wosiacki, 2012). Em seguida, a fase fermentativa alcoólica, predominantemente realizada por leveduras, converte os açúcares restantes em dióxido carbono (CO_2), etanol e metabólitos secundários (Walker e Stewart, 2016).

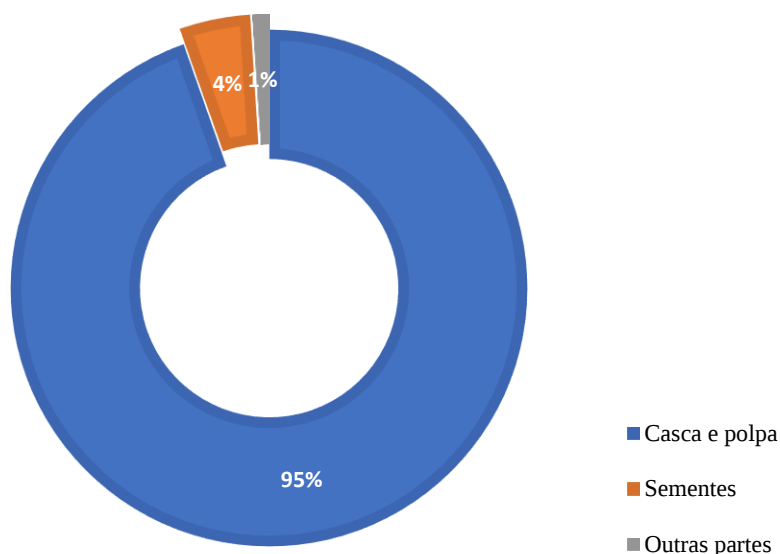
A fermentação malolática, que pode ocorrer espontaneamente ou ser induzida pela adição de bactérias lácticas (Cerri *et al.*, 2023), transforma o ácido málico em ácido láctico, reduzindo a acidez e conferindo maior suavidade à bebida final (Walker e Stewart, 2016). Este estágio também produz CO_2 , contribuindo para a estabilidade microbiana e gerando compostos voláteis que enriquecem o aroma (Cerri *et al.*, 2023). Após o período de fermentação, a bebida passa por um processo de eliminação das leveduras e é engarrafada (Lazzarotto *et al.*, 2012).

Bagaço de maçã

O bagaço de maçã é o principal subproduto da industrialização da maçã (Lyu *et al.*, 2020; Nogueira; Wosiacki, 2012). Composto por cascas, a polpa, o centro e as sementes (Coelho; Wosiacki, 2010; Skinner *et al.*, 2018), seu conteúdo está detalhado no Gráfico 1.2.

Tradicionalmente descartado como resíduo e sem valor comercial, o bagaço de maçã revela-se uma fonte promissora de compostos bioativos, pois retém aproximadamente 58% dos fitoquímicos da maçã após o processamento (Heras-Ramírez *et al.*, 2012; Paganini *et al.*, 2005). Além de ser fonte de fibras, vitaminas, minerais, açúcares e outros nutrientes, mostrando-se como uma matéria-prima de valor para a indústria de alimentos, com potencial para agregar valor nutricional e outros benefícios à saúde (Ahmed *et al.*, 2022; Guiné *et al.*, 2021; Heras-Ramírez *et al.*, 2012; Kruczek *et al.*, 2023; Nogueira; Wosiacki, 2012; Skinner *et al.*, 2018). Contudo, sua composição físico-química, retenção de compostos bioativos e o rendimento do bagaço variam de acordo com método de processamento, a fase de maturação e a variedade da maçã (Coelho; Wosiacki, 2010; Dranca; Vargas; Oroian, 2020; Alberti *et al.*, 2016).

Gráfico 1.2 - Composição do bagaço de maçã



Fonte: Adaptado: Coelho; Wosiacki. Avaliação sensorial de produtos panificados com adição de farinha de bagaço de maçã. **Food Science and Technology**, v. 30, n. 3, p. 582-588, 2010; Nogueira; Wosiacki Apple cider fermentation. In: Handbook of plant based fermented food and beverage technology, **CRC Press**, 2 ed., p. 209-236, 2012.

A atividade bioativa do bagaço pode ser prevista pelos seus teores de floridzina, procianidina B2, rutina e isoquercetina, ácido protocatecuico e hiperina (Skinner *et al.*, 2018). Embora esses compostos fenólicos estejam distribuídos por toda a fruta, a maior parte se

concentra na casca, onde podem estar na forma livre ou ligados a açúcares, ficando a maior parte retidos no bagaço, após o processamento (Kalinowska *et al.*, 2014).

O bagaço é um substrato versátil para as aplicações biotecnológicas, com potencial aplicação como suplemento dietético, ingrediente ou aditivo alimentar (Skinner *et al.*, 2018). Além dos compostos bioativos, vitaminas e minerais, sua composição também inclui uma diversidade de ácidos graxos (15 tipos), aminoácidos (14 tipos) e ácidos voláteis (47 tipos) (Fărcaș *et al.*, 2022). Esse potencial tem impulsionado pesquisas focadas na obtenção de produtos e extração de compostos de alto valor agregado, como a extração de pectina (Dranca, Vargas e Oroian, 2020), compostos fenólicos (Benvenutti *et al.*, 2019; Soares *et al.*, 2008) e fibras alimentares (Quiles *et al.*, 2018). Além disso, o bagaço pode substituir ingredientes tradicionais, como demonstra o uso da farinha de bagaço de maçã (Coelho e Wosiacki, 2010), evidenciando a sua ampla aplicabilidade e potencial transformador neste setor.

A utilização do bagaço de maçã em outros alimentos tem demonstrado uma melhoria na qualidade aromática e nutricional, enriquecendo a composição geral dos produtos, alguns exemplos são: pães, produtos lácteos, bolos, entre outros (Büker *et al.*, 2021; Coelho e Wosiacki, 2010; Curutchet *et al.*, 2021; Lang, Wang e Zhao, 2021; León *et al.*, 2022; Quiles *et al.*, 2018; Vlad *et al.*, 2022). A incorporação desse subproduto nos produtos alimentícios contribui para a saúde, auxiliando na prevenção de alguns tipos de doenças, oferecendo benefícios antioxidantes e antimicrobianos, enquanto também atua como corante, aromatizante e conservante natural (Ahmed *et al.*, 2022; Fărcaș *et al.*, 2022; Lyu *et al.*, 2020). Esta abordagem não só enriquece o desenvolvimento e a tecnologia de alimentos com ingredientes sustentáveis e funcionais, como também minimiza o desperdício (Ahmed *et al.*, 2022), transformando o que antes era classificado como “resíduo” em “subprodutos alimentares” de grande valor agregado (Barreira; Arraibi; Ferreira, 2019).

Estudos pré-demonstraram que o bagaço de maçã e seus extratos apresentaram efeitos benéficos sobre o a saúde digestiva e metabolismo lipídico, atenuando distúrbios metabólicos como hiperglicemia e resistência insulínica. Adicionalmente, o bagaço contribui para a capacidade antioxidante e potencial uso como aditivo alimentar seguro (Skinner *et al.*; 2018).

No estudo com pó de bagaço de maçã, Kumar *et al.* (2024) concluíram que o produto possui uma diversidade de qualidades, incluindo retenção de água, absorção de gordura e redução da difusão da glicose. Além disso, o bagaço apresenta alto potencial de estabilidade, sendo uma fonte natural de fibras alimentares e fitoquímicos (Wang *et al.*, 2020). Suas propriedades funcionais incluem geleificação, texturização, absorção de gorduras, entre outras já mencionadas (Kumar *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2020).

1.3.2 Aromas e compostos voláteis

Os aromas sempre fizeram parte da alimentação, não apenas proporcionando estímulos sensoriais aos consumidores, mas também servindo como indicativo de alimentos com características rançosas e impróprias para o consumo (Parker, 2015). Com o passar do tempo, a relevância do aroma foi ampliada, desempenhando um papel importante na qualidade e na aceitação de alimentos e bebidas pelos consumidores (Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016).

Com isso, a compreensão e o estudo dos compostos aromáticos são fundamentais para aprimorar a qualidade sensorial aromática de alimentos e bebidas e aumentar sua aceitação pelos consumidores. A ciência de alimentos busca entender e explorar os compostos voláteis responsáveis pela formação do aroma, reconhecendo que esses compostos são influenciados por uma série de fatores, que vão desde a composição intrínseca dos alimentos, como açúcares, ácidos e compostos fenólicos, até fatores extrínsecos, como condições do solo, manejo, clima e o pós-colheita (Vilela *et al.*, 2019). Algumas enzimas, mesmo que indiretamente, estão envolvidas nesse processo, liberando os polifenóis que, por sua vez interagem com os compostos voláteis (Madeira Junior; Teixeira; Macedo, 2015).

Os compostos voláteis são os principais compostos responsáveis pelo aroma de bebidas e alimentos, embora a influência de cada um varie. Mesmo em concentrações mais baixas, alguns compostos podem contribuir significativamente para o perfil aromático das bebidas (Simões; Waszczynskyj; Wosiacki, 2009). Processos térmicos e fermentativos também influenciam esse perfil, modificando ou gerando novos compostos voláteis, como álcoois, ésteres, aldeídos e outros, que contribuem para o aroma e sabor característicos (Vilela *et al.*, 2019). A percepção dos aromas ocorre pela detecção do olfato e paladar durante a ingestão do alimento ou bebida (Simões; Waszczynskyj; Wosiacki, 2009). Esse processo complexo inicia-se com a liberação dos compostos aromáticos, que são detectados pelas vias ortonasal e retronasal, sendo a mastigação essencial para a sua intensificação (Ployon; Morzel; Canon, 2017; Simões; Waszczynskyj; Wosiacki, 2009). A percepção e a intensidade aromática também são moduladas pela composição da saliva, número de deglutições e abertura do palato mole (Ployon, Morzel; Canon, 2017).

Os polifenóis presentes em bebidas influenciam suas características sensoriais, conferindo cor, amargor, adstringência e aroma (Benvenuti *et al.*, 2019; Sobczak *et al.*, 2022; Verdu *et al.*, 2014). No caso do aroma, essa influência se dá pela alteração da solubilidade e volatilidade dos compostos aromáticos (Benvenuti *et al.*, 2019; Sobczak *et al.*, 2022; Verdu *et*

al., 2014). Portanto, os polifenóis são considerados como importantes componentes contribuintes na formação do aroma das bebidas (Guo; Yue; Yuan, 2019). A interação entre compostos voláteis e polifenóis, especialmente durante a fermentação, contribui para a formação e liberação de terpenos livres, conferindo aromas frutados florais a bebidas (Wang *et al.*, 2021). O estudo de Wang *et al.* (2021), demonstrou a importância dessa interação na formação e liberação do perfil aromático.

Na maçã, já foram encontrados mais de 300 compostos aromáticos, predominantemente ésteres, além de álcoois, aldeídos, cetonas e éteres (Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016; Guiné *et al.*, 2021; Roberts; Spadafora, 2020). A concentração desses compostos varia de acordo com diversos fatores, incluindo o estágio de maturação, a cultivar, as condições climáticas, o período e práticas de colheita, as condições de armazenamento, influenciando diretamente o aroma final da fruta (Espino-Díaz, Sepúlveda e Gonzáles-Aguilar, 2016; Tavares *et al.*, 2023). A Tabela 1.3 apresenta alguns compostos presentes nas maçãs e em seus derivados.

O perfil aromático de cada variedade de maçã possui é único e dinâmico, variando ao longo do processo de maturação, servindo como indicador do seu estágio como marcador de cultivar (Hadi, El *et al.*, 2013; Roberts; Spadafora, 2020; Santos *et al.*, 2016). Inicialmente, o aroma é dominado por aldeídos (hexanal, trans-2-hexanal e butanal), provenientes do catabolismo de ácidos graxos e aminoácidos de cadeia ramificada (Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016). Com o amadurecimento da fruta, a concentração desses aldeídos diminui, tornando-se imperceptível (Braga *et al.*, 2013; Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016). Essa redução é, em parte, catalisada pela enzima álcool desidrogenase (ADH), que converte aldeídos em álcoois, precursores dos ésteres. Na etapa final da síntese, o álcool transferase (AAT) converte esses álcoois em ésteres, contribuindo para o aroma característico da maçã (Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016). A formação dos ésteres, como acetato de butila, acetato de hexila, acetato de 2-metilbutila e 2-metil-butanato de etila, também ocorre via catabolismo de ácidos graxos e aminoácidos (Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016; Roberts; Spadafora, 2020).

Tabela 1.3 - Principais compostos voláteis da maçã cv. Gala *in natura*, suco de maçã, bagaço de maçã e sidra

		(continua)			
Classes	Compostos voláteis	Maçã*	Mosto*	Bagaço**	Sidra*
Ésteres	Acetato de etila		✓		✓
	Acetato de isoamila		✓		✓
	Acetato de butila	✓	✓	✓	✓
	Acetato de isobutila		✓		✓
	Butanoato de etila		✓		✓
	Acetato de hexila	✓	✓	✓	✓
	Hexanoato de etila		✓	✓	✓
	Hexanoato de hexila			✓	
	Decanoato de etila			✓	✓
	Acetato de 2-feniletila			✓	
	Acetato de 2-metilbutila	✓			
	2-Metilbutanoato de hexila			✓	
	Dodecanoato de etila		✓	✓	✓
	Octanoato de etila			✓	✓
	Octanoato de butila	✓			
	Octanoato de hexila			✓	
	Dietilbutanodiato		✓		
	Propionato de 2-hidroxietila				✓
	Succinato de dietila				✓
Álcoois	2-Feniletanol		✓	✓	✓
	3-metil-1-butanol		✓		✓
	2-metil-1-butanol			✓	✓
	1-Hexanol		✓	✓	✓
	2-Hexanol		✓		✓
	2,3-Butanodiol				✓
	1-butanol		✓		
	1-octen-3-ol			✓	
	6-metil-5-hepten-2-ol			✓	
	Isobutanol				✓
Ácidos	Ácido butanóico		✓		✓
	Ácido octanóico		✓		✓
	Ácido tioacético			✓	
Aldeídos	Hexanal		✓	✓	
	2-Hexenal		✓	✓	
	Acetaldeído		✓		✓
	Nonanal			✓	
	2-Nonenal			✓	
	Benzaldeído			✓	
	Heptanal			✓	
	2-Heptenal			✓	
	2-Octenal			✓	
	2-Heptanona		✓		✓
	2-Octanona		✓		✓

Tabela 1.3 - Principais compostos voláteis da maçã cv. gala *in natura*, suco de maçã, bagaço de maçã e sidra

		(conclusão)			
Classes	Compostos voláteis	Maçã*	Mosto*	Bagaço**	Sidra*
Cetonas	6-metil-5-hepten-2-ona			✓	
	2-hexanona				✓
Outros	α -farnesene		✓	✓	
	α -curcumenol			✓	
	Metil dissulfeto			✓	

Fonte: Adaptado: BRAGA, C. M. *et al.* Classification of juices and fermented beverages made from unripe, ripe and senescent apples based on the aromatic profile using chemometrics. Food Chemistry, v. 141, n. 2, p. 967–974, 2013; CARPES, S. T. *et al.* Bio-based films prepared with apple pomace: Volatiles compound composition and mechanical, antioxidant and antibacterial properties. **LWT**, v. 144, 1 jun. 2021; TARKO, T.; DUDA, A. Volatilomics of Fruit Wines. **Molecules**, v. 29, n. 2457, 23 Maio 2024; TAVARES, C. *et al.* Effects of Different Irrigation Regimes, Nitrogen Levels and Storage Conditions on Volatiles of ‘Gala’ Apple. **Molecules**, v. 28, n. 18, p. 6610, 1 set. 2023.

Nota: *variedade gala; **bagaço de maçã de Gala e Fuji.

O aroma característico da maçã Fuji é resultado da combinação de 84 compostos voláteis, entre os quais se destacam o acetato de butila, acetato de 2-metilbutila, acetato de hexila e o α -farneseno (sequiterpeno) (Simões; Waszczynskyj; Wosiacki, 2009). A maçã Gala (Tabela 1.3), por sua vez, apresenta em sua composição acetato de butila, acetato de hexila, acetato de 2-metilbutila, hexanoato de hexila, hexanoato de 2-metilbutila, hexanoato de butila e octanoato de butila, com o trans - α -farneseno predominando em frutos intactos (Tavares *et al.*, 2023). Enquanto, o aroma da variedade Granny Smith está associado ao γ -himachalene, um sesquiterpenos (Roberts; Spadafora, 2020).

Em sucos e mostos de frutas, o aroma é um fator determinante na avaliação da qualidade, refletindo diretamente o aroma da fruta *in natura* (Nikfardjam; Maier, 2011; Zhu *et al.*, 2021). As etapas de processamento, como prensagem, filtração e pasteurização, também podem alterar significativamente as concentrações de compostos voláteis, podendo inclusive promover a formação de novos compostos e, conseqüentemente, alterar o aroma final do produto (Nikfardjam; Maier, 2011; Zhu *et al.*, 2021). A Tabela 1.3 compara a composição de compostos voláteis entre a fruta, mosto, bagaço e sidra.

O bagaço de maçã apresenta cerca de 42 compostos voláteis, com os terpenóides representando quase 1/3 do total (Carpes *et al.*, 2021). Além disso, Muresan *et al.* (2024) observaram que o bagaço de maçã é rico em compostos voláteis aromáticos e sua adição em muffins pode influenciar o perfil aromático final do produto.

Na produção de sidra, a qualidade final depende fundamentalmente do aroma, fortemente influenciado pela atividade metabólica das leveduras durante a fermentação alcoólica, principalmente pelas vias metabólicas dos aminoácidos (Lu *et al.*, 2023). A

composição desses metabólitos aromáticos é determinada por diversos fatores, como a origem geográfica das maçãs, a cultivar, a microbiota nativa, os microrganismos selecionados para a fermentação, o tempo de fermentação, a presença de nutrientes adicionais e as técnicas de processamento (Guiné *et al.*, 2021; Lu *et al.*, 2023; Tarko; Duda, 2024). Com isso, o perfil aromático das sidras resulta de uma complexa mistura de compostos, incluindo álcoois superiores, ésteres, ácidos graxos, ácidos, aldeídos e cetonas, muito dos quais são formados durante a fermentação alcoólica (Guiné *et al.*, 2021).

Durante a fermentação alcoólica, a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, sintetiza diversos compostos voláteis, incluindo álcoois superiores como o isoamílico (derivado da leucina) e o feniletílico (derivado da fenilalanina), cuja concentração e qualidade no mosto influenciam a cinética fermentativa e o perfil aromático final (Lu *et al.*, 2023). A disponibilidade desses aminoácidos é, portanto, importante.

Os compostos fenólicos presentes no mosto, como ácido hidroxicinâmico e flavonoides, também contribuem significativamente para a qualidade aromática da bebida fermentada (Guiné *et al.*, 2021). Eles influenciam a volatilidade e a solubilidade dos compostos voláteis, modulando a intensidade de seus aromas por meio de interações sinérgicas (Guo; Yue; Yuan, 2019).

A complexidade do perfil volátil aromático da sidra de maçã Gala (Tabela 1.3), ilustra a influência da interação desses fatores citados. Os principais compostos identificados foram acetaldeído (47,2-159,1 mg/L), 3-metil-1-butanol (54,7-119,4 mg/L) e propionato de 2-hidroxietila (13,3-34,0 mg/L), com concentrações variáveis dependendo do estágio de maturação da fruta (Braga *et al.*, 2013). Portanto, o perfil aromático de bebidas fermentadas envolve múltiplos fatores e impacta sua qualidade sensorial.

1.3.3 Secagem de alimentos

A secagem ou desidratação é um processo essencial e eficaz para a preservação de alimentos, removendo a água e convertendo-a em vapor (Celestino, 2010; Ertekin; Firat, 2017). Esse processo ocorre por meio de uma fonte de calor ou por sublimação, reduzindo seu teor de umidade, inibindo a degradação enzimática e oxidativa, além de inativar microrganismos, preservando fitoquímicos e prolongando a vida útil do alimento (Celestino, 2010; Ertekin; Firat, 2017; Fathi *et al.*, 2022). As frutas, devido ao seu alto teor de água, beneficiam-se significativamente desse processo, que permite seu consumo fora da sazonalidade e facilita o transporte e armazenamento, pois ocorre a redução da umidade e do volume final da fruta

(Castro; Mayorga; Moreno, 2018). A secagem pode ser realizada de forma natural, como ao sol, ou artificial, utilizando diversas técnicas, como secagem convectiva, por micro-ondas e liofilização (Celestino, 2010).

1.3.3.1 Natural

A secagem natural, técnica tradicional e econômica de conservação de alimentos, consiste na exposição da matéria-prima ao sol, direta ou indiretamente (Petikirige; Karim; Millar, 2022). Na secagem direta, a radiação solar evapora a água, enquanto na indireta, são utilizados secadores mecânicos, mas que ainda são dependentes da energia solar e da circulação de ar ambiental (Petikirige; Karim; Millar, 2022). Embora essas técnicas preserve as propriedades sensoriais (cor, sabor e textura), a técnica exige longa exposição ao sol com alta radiação solar, temperaturas entre 35 °C e 40 °C, e baixa umidade relativa do ar (Celestino, 2010; Mugi; Chandramohan, 2021).

1.3.3.2 Artificial

As técnicas de secagem artificial utilizam equipamentos especializados que permitem controlar a temperatura, a velocidade e a umidade do ar, otimizando a transferência de massa e calor com maior eficiência que a secagem natural (Adeyeye; Ashaolu; Babu, 2022; Celestino, 2010). Sua independência das condições climáticas garante maior controle do processo e assegura produtos de qualidade superior (Celestino, 2010). As diversas técnicas de secagem artificial diferem quanto ao modelo de equipamento, princípio de funcionamento e tipo de transferência de calor, que se classifica em três categorias: alta temperatura, baixa temperatura e dielétrica (Fathi *et al.*, 2022). Cada técnica emprega equipamentos específicos e mecanismos que favorecem a transferência de massa e calor, proporcionando o controle do processo (Celestino, 2010).

A escolha da técnica é importante, pois impacta diretamente as características do produto, alterando cor, textura, sabor e a preservação dos compostos bioativos, o que afeta a qualidade geral do alimento desidratado (An *et al.*, 2016). Portanto, é fundamental analisar a técnica mais adequada para valorizar a extração dos compostos desejados e potencializar suas propriedades funcionais, aproveitando os benefícios inerentes ao alimento. Entre as técnicas de secagem artificial disponíveis, destacam-se: convectivo (circulação de ar quente), micro-ondas, e liofilização.

Secagem em estufa

Também conhecida por convectiva por ar quente, é a mais comum entre as técnicas artificiais e simula a secagem ao sol em um ambiente controlado. Utiliza equipamentos com compartimentos para bandejas perfuradas, que permitem a circulação de ar quente e garantem uma secagem mais homogênea do material (Martins *et al.*, 2020). O processo consiste na passagem contínua de ar quente a temperatura constante, promovendo a transferência de calor e massa e, conseqüentemente, a remoção de uma parte da água do alimento (Adeyeye; Ashaolu; Babu, 2022; Castro; Mayorga; Moreno, 2018). A transferência de energia na superfície ocorre por convecção e, internamente, por difusão, convecção ou capilaridade, dependendo da estrutura do alimento. A taxa de secagem e as características finais do produto são influenciadas pela estrutura do alimento, espessura, geometria, complexidade e composição (Castro; Mayorga; Moreno, 2018). Apesar de ser uma técnica artificial mais comum, apresenta desvantagens como alto consumo de energia, tempo de processamento prolongado e temperaturas elevadas, que podem degradar compostos importantes e afetar a qualidade do alimento (Adeyeye; Ashaolu; Babu, 2022; An *et al.*, 2016; Ancos *et al.*, 2018; Petikirige; Karim; Millar, 2022). A resistência interna à remoção de água, aliada às taxas de difusão reduzidas e à secagem de superfície, impõem limitações que resultam em maior tempo de exposição ao calor e possíveis alterações do produto (Haghighi *et al.*, 2013).

Micro-ondas

É um tipo de secagem dielétrica (Adeyeye; Ashaolu; Babu, 2022). É uma técnica mais rápida e eficiente, embora apresente um custo elevado do equipamento (Fathi *et al.*, 2022; Yang; Chen, 2022). O calor interno resulta do campo eletromagnético, causando atrito e vibração molecular, gerando uma diferença de pressão que impulsiona a rápida vaporização interna do material. Esse processo, semelhante a um bombeamento forçado, transporta o líquido para a superfície na forma de vapor, promovendo secagem rápida sem superaquecimento do ambiente e reduzindo o risco de danos ao material (Chandrasekaran; Ramanathan; Basak, 2013; Kusuma *et al.*, 2023). A eficiência do processo é influenciada pela geometria do material, sendo que formas cilíndricas e esféricas demonstram melhor desempenho devido à maior densidade volumétrica de potência absorvida e ao aquecimento mais uniforme em seu interior e superfície (Chandrasekaran; Ramanathan; Basak, 2013). Entretanto, é necessário o controle preciso da distribuição do calor para prevenir queimaduras, escurecimento e ressecamento do produto (Adeyeye; Ashaolu; Babu, 2022; An *et al.*, 2016; Jia *et al.*, 2019).

Liofilização

É um tipo de secagem que se destaca por ocorrer através da sublimação, onde a água passa do estado sólido diretamente para a fase gasosa sob vácuo (Adeyeye; Ashaolu; Babu, 2022; An *et al.*, 2016; Ancos *et al.*, 2018). Por não utilizar altas temperaturas, esse sistema permite que o alimento mantenha suas propriedades nutricionais, bioativas e sensoriais, como cor e sabor, além de melhorar a sua estabilidade durante o armazenamento (An *et al.*, 2016; Ancos *et al.*, 2018; Fathi *et al.*, 2022). Contudo, a liofilização é uma técnica de longa duração e apresenta um custo elevado (An *et al.*, 2016; Ancos *et al.*, 2018).

A seleção da técnica de secagem ideal deve considerar as características desejadas no produto final, equilibrando a preservação de compostos bioativos com a qualidade sensorial do alimento e outras características, pois cada técnica apresenta vantagens e desvantagens pretendida (Adeyeye; Ashaolu; Babu, 2022). A escolha ótima, portanto, dependerá do tipo de alimento e de sua aplicação.

1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi revisada a literatura existente sobre maçãs, seus produtos e subprodutos, com ênfase nos compostos fenólicos e voláteis. Explorou-se a influência do aroma na qualidade de alimentos e bebidas, destacando como os compostos fenólicos interferem nessa característica. Também foram discutidas diferentes técnicas de secagem e seus impactos na preservação e extração dos compostos bioativos.

Essa revisão fornece a base para as análises e discussões dos capítulos subsequentes, que incluem o impacto de diferentes técnicas de secagem na extração de compostos fenólicos do bagaço de maçã; a incorporação do extrato fenólico em bebidas derivadas de maçã em diferentes proporções, para avaliar sua influência na fermentação e na formação de compostos voláteis aromáticos nos mostos e sidras; e a análise dos compostos fenólicos e da atividade antioxidante de extratos, mostos e sidras.

Dessa forma, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre os compostos fenólicos e sua relação com os compostos voláteis aromáticos em bebidas.

CAPÍTULO 2 – ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS EFEITOS DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SECAGEM NA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS FENOLICOS DO BAGAÇO DE MAÇÃ

RESUMO

A escolha de técnica de secagem modificou significativamente a cor, a estrutura morfológica e o conteúdo de compostos bioativos. Neste capítulo comparou a secagem por liofilização, em micro-ondas (509 e 610 W) e em estufa de circulação de ar quente (40, 50 e 60 °C), avaliando à cinética de secagem, a eficiência do processo e a extração de fenóis. Os tempos de secagem variaram de 12 minutos (micro-ondas) a 2880 minutos (liofilização). O modelo matemático de Midilli-Kucuk foi o que melhor descreveu a cinética de secagem. A microscopia eletrônica de varredura revelou maior porosidade nos bagaços secos por liofilização e micro-ondas. A análise de cor revelou diferenças significativas. A liofilização resultou em maior ângulo *Hue* (69,6°) e luminosidade ($L^* > 60$), enquanto as demais técnicas apresentaram $L^* < 60$. A secagem em estufa a 40 °C apresentou coordenada a^* (13,4), enquanto a secagem a 50 °C exibiu maiores valores para b^* (29,4) e *chroma* (31,7), indicando maior vivacidade. A secagem em micro-ondas a 610W apresentou os menores valores para a^* (10,6), b^* (23,9) e *chroma* (26,2). A extração de fenóis variou significativamente entre as técnicas. A liofilização resultou em maior teor de fenólicos totais e maior capacidade antioxidante. A secagem em estufa de ar quente, especialmente a 60 °C, resultou teores de fenólicos e menor capacidade antioxidante. Os teores de flavonoides totais foram influenciados pela temperatura e potência aplicada. A análise por HPLC identificou ácidos hidroxicinâmicos, flavan-3-óis, procianidinas, dihidrochalconas e flavonóis, sendo o ácido clorogênico e a floridzina os mais abundantes. A liofilização preservou e concentrou melhor os compostos bioativos nos extratos, seguida pela secagem por micro-ondas a 509 W. Embora mais acessível, a secagem por estufa pode comprometer a qualidade dos extratos, comprometendo a liberação ou causando a degradação de compostos fenólicos. Esses achados são fundamentais para otimizar as técnicas de secagem na indústria de alimentos, assegurando a preservação e a extração eficiente de compostos fenólicos.

Palavras - chave: Cinética de secagem. Micro-ondas. Liofilização. Estufa de circulação de ar quente. Atividade antioxidante.

2.1 INTRODUÇÃO

A maçã é uma das frutas mais consumidas no mundo, principalmente na forma *in natura*. Aproximadamente 25% das maçãs são processadas, gerando resíduos, os quais são compostos por casca, polpa e sementes (Nogueira; Wosiacki, 2012; Skinner *et al.*, 2018). Embora o bagaço tenha elevado teor de nutrientes e compostos bioativos com potencial alimentício, ele é frequentemente descartado (Skinner *et al.*, 2018). Esses compostos, em especial os fenólicos, desempenham funções biológicas importantes no organismo humano (Birtic *et al.*, 2019; Nur Syukriah *et al.*, 2014) e podem ser utilizados para enriquecer alimentos, melhorando sua qualidade sensorial e valor nutricional (Alberti *et al.*, 2016).

Seu teor de umidade varia entre 70 e 80% (Asif *et al.*, 2024), é altamente suscetível à deterioração microbiana e à oxidação enzimática, que afetam negativamente os polifenóis (Asif *et al.*, 2024; Kauser *et al.*, 2024). A secagem é uma alternativa amplamente utilizada para a reduzir a umidade a teores inferiores a 10%, tornando o bagaço microbiologicamente seguro (Tze *et al.*, 2012). No entanto, a manutenção de suas características sensoriais e compostos bioativos após a secagem depende das técnicas empregadas e das condições aplicadas (Ertekin; Firat, 2017; Teymori-Omran *et al.*, 2023), pois cada matriz alimentar apresenta estruturas diferentes, podendo facilitar ou dificultar a difusão da água.

A temperatura é uma variável crítica no processo, pois afeta tanto o tempo de processamento quanto as propriedades finais do produto, como cor, textura, sabor e a integridade dos compostos termossensíveis. Altas temperaturas podem degradar os compostos bioativos (Teymori-Omran *et al.*, 2023). No entanto, a temperatura também pode alterar a disponibilidade dos compostos fenólicos, dependendo das condições específicas do tratamento térmico (Antony; Farid, 2022; Murtaza *et al.*, 2020; Pascariu; Pop; Albu, 2014). Além disso, o tempo de exposição desempenha um papel importante na estabilidade dos fenóis (Antony; Farid, 2022).

A escolha da técnica de secagem mais eficiente deve considerar as características da matriz alimentar, para preservar suas propriedades nutricionais e bioativas, reduzindo possíveis interferentes durante a transferência de massa (Petikirige; Karim; Millar, 2022). A avaliação da cinética de secagem é fundamental para otimizar o processo e garantir um produto uniforme e de qualidade, minimizando a degradação de nutrientes e compostos bioativos (Boateng *et al.*, 2021). Os modelos matemáticos são amplamente utilizados para compreender as propriedades físico-químicas, transferência de massa e calor, regular a operação e maximizar a eficiência energética (Boateng *et al.*, 2021). Entre os modelos, os de camada fina são empregados para simular a cinética de secagem e a transferência de massa e calor, atuando como uma ferramenta preditiva para o processo (El-Mesery *et al.*, 2024).

Este capítulo investigou o impacto de diferentes técnicas de secagem – liofilização, micro-ondas e estufa de circulação de ar quente - na cinética de secagem, na extração dos compostos fenólicos e na capacidade antioxidante dos extratos de bagaço de maçã. A comparação focou nas propriedades físicas e nos compostos bioativos, com o objetivo de identificar a técnica mais eficiente para extrair os compostos fenólicos e seus potenciais aplicações na indústria alimentícia, como na produção de sidras.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Materiais

Este estudo foi conduzido na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), *Campus Uvaranas*, em Ponta Grossa, Paraná, Brasil. As maçãs utilizadas foram da cultivar Gala, adquiridas no comércio do município de Curitiba, Paraná, Brasil.

Os reagentes utilizados no estudo foram: Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-ácido carboxílico), TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil) -s-triazina), DPPH (2,2-difenil-2-picrilhidrazil) e ABTS (2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-ácido sulfônico)) e Folin-Ciocalteu, todos da empresa Sigma-Aldrich (Steinheim, Alemanha). O etanol 99,5% (Anidrol, São Paulo, Brasil) foi utilizado como solvente no processo de extração de compostos fenólicos. Os padrões para as curvas foram: ácidos 5-cafeoilquínico (ácido clorogênico), catequina, ácido *p*-cumárico, ácido cafeico, floridzina, quercetina-3-D-galactosídeo (hiperosídeo), quercetina-3- β -D-glucosídeo (isoquercetina), quercetina-3-O-ramnosídeo (quercitrina), quercetina-3-rutinosídeo (rutina) e quercetina-O- α -L arabinofuranosídeo (avicularina), todos adquiridos da Sigma-Aldrich (Steinheim, Alemanha). Para o preparo das soluções aquosas foi utilizada água ultrapura (Milli-Q, Millipore, Brasil). Os solventes utilizados para dissolver amostras e preparar a fase móvel para análises cromatográficas foram metanol (99,9%), acetonitrila, ácido acético e ácido sulfúrico (JTBaker, Estados Unidos), todos de grau cromatográfico.

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Obtenção do bagaço de maçã

O bagaço foi obtido a partir da extração do mosto de maçã. O processamento foi realizado em nível de escala piloto no laboratório de processamento de frutas da UEPG, Departamento de Engenharia de Alimentos. Inicialmente, as maçãs foram selecionadas, lavadas em água corrente e sanitizadas em solução de hipoclorito de sódio a 200 mg/L por 10 minutos, conforme Gomes *et al.* (2014), seguido de enxágue em água corrente para a remoção do hipoclorito de sódio. As frutas foram trituradas e prensadas a frio utilizando o Triturador-prensa (AGM Máquinas, 70 L/h, RS, Brasil), resultando na separação do mosto e do bagaço úmido. O bagaço gerado foi de aproximadamente 24% do peso total das maçãs processadas.

2.2.2.2 Secagem do bagaço

O processo de secagem foi realizado em quatro repetições de 30 g cada, utilizando três técnicas distintas: liofilização, micro-ondas e estufa de ar quente, com ajustes de temperaturas e níveis de potência conforme necessário. Antes do início do processo de secagem, todas as amostras foram pesadas, e a perda da massa foi monitorada por meio de pesagens sucessivas até o peso constante, exceto as liofilizadas, que foram pesadas apenas no início e no final do processo.

Após a secagem, as amostras foram trituradas para garantir uma granulometria uniforme, com malhas entre 20 e 40 mesh (Benvenuti *et al.*, 2022). Em seguida, foram armazenadas em dessecador à temperatura ambiente até a preparação dos extratos (Benvenuti *et al.*, 2022). Os parâmetros de secagem, como temperatura para a estufa de circulação de ar quente e potência para o micro-ondas, foram estabelecidos com base em testes preliminares.

Secagem em estufa de circulação de ar quente

Nessa técnica, foi utilizada uma estufa de circulação de ar quente (Tecnal, TE-394/2, SP, Brasil). As amostras foram alocadas sobre telas que permitiam a circulação de ar. O processo foi realizado em três temperaturas distintas: 40 °C, 50 °C e 60 °C, selecionadas com base em estudos preliminares. O tempo de secagem foi determinado pela estabilização da massa de cada amostra, após duas medições consecutivas sem variação do peso, o qual variou de acordo com a temperatura a que a amostra foi submetida. As amostras foram nomeadas de T40 °C, T50 °C e T60 °C.

Secagem em micro-ondas

O bagaço foi seco em micro-ondas doméstico (Brastemp Jet Defrost 27 litros, Brasil). Utilizaram-se duas configurações de potência, 509 W e 610 W, correspondentes aos programas P7 e P8, respectivamente. As potências foram definidas com base em estudos preliminares. O peso foi monitorado até o alcance do peso constante, após duas medições consecutivas. A pesagem ocorreu inicialmente em intervalos de 1 minuto e depois em intervalos de 30 segundos. Para a determinação das potências reais nos programas P7 e P8, utilizou-se o método descrito por Souza; Nogueira; Rassini (2002). Este método, pesou-se 1 kg de água em temperatura ambiente ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) em um recipiente de polipropileno. A potência do micro-ondas foi selecionada e a água aquecida por 2 minutos, seguida de agitação para homogeneização térmica

e medição da temperatura. O cálculo da potência absorvida pela amostra foi baseado na seguinte equação:

$$P_r = 34,86 * (T_f - T_o) \quad (2.1)$$

em que:

P_r = potência aparente absorvida pela amostra em watts

T_f = temperatura final

T_o = temperatura inicial

34,86 = coeficiente de calibração (constante)

As amostras secas por micro-ondas foram designadas de M7 (potência 509W) e M8 (potência 610W).

Secagem por liofilização

As amostras foram pesadas e colocadas em recipientes de plástico. Em seguida, foram submetidas a um congelamento rápido em ultra-freezer (Nuair, NU-9668GC, USA) a -80 °C. Após o congelamento, as amostras foram colocadas no liofilizador (Solab, SL-404, SP, Brasil), sob vácuo a -40 °C por aproximadamente 42 horas. Esse procedimento visou uma secagem adequada, resultando em uma redução de peso próximo a 79%, que corresponde à umidade bruta do bagaço *in natura*.

2.2.2.3 Determinação da cinética de secagem e ajuste por modelos matemáticos

A análise cinética de secagem do bagaço de maçã, assim como a modelagem matemática foi realizada para as amostras secas na estufa de circulação de ar e no micro-ondas. No entanto, não foi possível aplicar a modelagem na secagem por liofilização devido à ausência de condições adequadas para a pesagem durante o processo, impossibilitando a obtenção de dados experimentais necessários para a análise da cinética e os ajustes a modelos matemáticos.

A curva de secagem é essencial para compreender a dinâmica do processo, correlacionando o tempo e o teor de umidade em base seca. Para esse processo, primeiramente determinou-se a umidade inicial do bagaço, pela metodologia oficial descrita pelo AOAC (AOAC International, 2000), em que a amostra é seca em estufa a 105 °C até a eliminação completa da água. Os cálculos dos teores de umidade foram feitos de acordo com as equações 2.2 e 2.3.

$$U_{(b.u)} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) * 100 \quad (2.2)$$

$$U_{(b.s)} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_f} \right) * 100 \quad (2.3)$$

em que,

$U_{(b.u)}$ – umidade em base úmida

$U_{(b.s)}$ – umidade em base seca

$P_i - P_f$ – corresponde a água evaporada

P_i – peso inicial da amostra, corresponde ao peso total da amostra

P_f – peso final da amostra, peso de equilíbrio

Os dados de umidade, em cada tempo, foram convertidos para razão de umidade, uma medida adimensional. Esse ajuste contribui para a análise e ajuste dos processos de secagem, prevê o comportamento cinético, auxilia no planejamento e controle dos sistemas de secagem (Castro, Mayorga e Moreno, 2018).

Os resultados da secagem do bagaço de maçã foram correlacionados com quatro modelos matemáticos semiteóricos para descrever o fenômeno da secagem. Os modelos utilizados foram o de Page (Page, 1949), Midilli-Kucuk (Midilli; Kucuk; Yapar, 2002), Newton (Lewis, 1921) e Henderson e Pabis (Henderson; Pabis, 1961), os modelos e suas respectivas equações se encontram na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Modelos matemáticos usados na modelagem da secagem do bagaço de maçã

Modelo	Equação	Referência	Nº
Page	$Ru = \exp(-k \cdot t^n)$	Page, 1949	(2.4)
Midilli-Kucuk	$Ru = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	Midilli; Kucuk e Yapar, 2002	(2.5)
Newton	$Ru = \exp(-k \cdot t)$	Lewis; 1921	(2.6)
Henderson e Pabis	$Ru = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis; 1961	(2.7)

Fonte: Adaptado: HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering**, v. 6, p. 169–174, 1961; LEWIS, W. K. The symposium on drying: The Rate of Drying of Solid Materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 3, p. 427–432, May 1921; MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503–1513, ago. 2002; PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. West Lafayette: Purdue University, 1949.

em que,

k – constante de secagem,

t – Tempo de secagem,

a, b, n – constantes dos modelos, adimensionais

Ru – Razão de umidade da amostra, adimensional, que foi determinado pela equação 2.8.

$$Ru = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (2.8)$$

em que,

U – Teor de umidade em determinado tempo

U_i - teor de umidade inicial

U_e – teor de umidade de equilíbrio

Para cada método de secagem, calculou-se as médias e determinou-se os teores de umidade inicial e a umidade final das amostras, a fim de traçar as curvas de secagem para cada técnica. As análises de regressão não linear foram realizadas utilizando o software *Statistica* 8.0, com o algoritmo Quasi-Newton. A precisão do ajuste dos modelos matemáticos de secagem foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R²) e pelo desvio quadrado médio (DQM) entre os valores observados e preditos. Modelos com R² maior e mais próximo de 1 e DQM menor e próximo de zero indicam melhor ajuste da secagem ao modelo matemático. Com base nesses critérios, foi selecionado o modelo matemático que apresentou o melhor desempenho.

2.2.2.4 Captação de imagem por microscopia eletrônica de varredura - MEV

As amostras secas de bagaço de maçã foram submetidas à microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo – MEV (MIRA 3, Tescan, República Tcheca) para a captação de imagens e a comparação das estruturas resultantes dos diferentes métodos de secagem aplicados. As amostras foram afixadas em suporte de alumínio com auxílio de fita dupla face de carbono e em seguida revestidas com ouro.

2.2.2.5 Determinação do teor de umidade

A determinação da umidade foi realizada de acordo com a metodologia AOAC (AOAC International, 2000). Para isso, 5 g de amostra foram pesados em cadinho de alumínio e levados a estufa à 105 °C até atingir o peso constante, verificado por duas pesagens consecutivas sem alteração de peso. A verificação foi realizada em triplicata.

2.2.2.6 Análise colorimétrica

A influência do tipo de secagem na cor foi avaliada através da leitura do espaço de cor L*a*b* (L* = luminosidade; a* = vermelho/verde; b* = amarelo/azul). A leitura foi realizada

com um espectrofotômetro digital CM - 5 (Konica Minolta, Japão) e o software SpectraMagic NX CM-S10w (Osaka, Japão). Tanto a calibração quanto as leituras das cores das amostras foram realizadas conforme as orientações do fabricante. A partir dos dados coletados, foram obtidos os valores de *Chroma* (intensidade da cor) e do ângulo *Hue* (tonalidade), de acordo com as equações de Mcguire (1992), 2.9, 2.10 e 2.11.

A análise de cor forneceu os seguintes parâmetros:

- Luminosidade (L^*): indica a claridade do produto.

- Coordenadas cartesianas das cores vermelho/verde (a^*) e amarelo/azul (b^*): essas coordenadas indicam a tonalidade da cor. Com esses dados, calculou-se os valores de:

- *Chroma*: indica saturação ou intensidade da cor.

$$C = (a^*^2 + b^*^2)^{1/2} \quad (2.9)$$

- Ângulo *Hue*: indica a tonalidade da cor.

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) + 180 \text{ quando } a < 0 \quad (2.10)$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \text{ quando } a > 0 \quad (2.11)$$

Utilizando a ferramenta online *Color Designer* (<https://colordesigner.io/convert/labtorgb>), as coordenadas colorimétricas do espaço CIE Lab. foram convertidas para o sistema RGB, gerando a representação visual das cores correspondentes, facilitando a interpretação dos resultados.

2.2.2.7 Extração dos compostos fenólicos

A extração dos compostos fenólicos seguiu o método descrito por Benvenuti *et al.* (2022), com adaptações. O processo de extração foi realizado por maceração com razão sólido/líquido de 1:20 (m/v), empregando solução aquosa de etanol a 60%. A extração ocorreu a 50 °C em banho-maria por 20 minutos, após a mistura foi filtrada para a remoção do bagaço. O extrato foi então centrifugado (MPW-351, Varsóvia, Polônia) a 4500 x *g* por 20 minutos para a retirada das partículas excedentes. O sobrenadante foi coletado e o etanol removido em evaporador rotativo (Tecnal TE-211, Piracicaba, SP, Brasil) a uma temperatura máxima de 50 °C. O volume final de cada amostra foi padronizado. O extrato obtido foi armazenado à -18 °C até o momento das análises químicas e instrumentais.

Para a análise de HPLC, os extratos foram liofilizados e armazenados até o momento da análise. No momento da utilização, as amostras foram reconstituídas em solução de ácido acético 2,5% e metanol (3:1). Para cada tipo de secagem, foram preparados três extratos a partir das repetições da secagem.

2.2.2.8 Caracterização dos extratos de compostos fenólicos

2.2.2.8.1 Determinação dos compostos fenólicos totais - TPC

Foi determinado, por análise espectrofotométrica usando o reagente *Folin-Ciocalteu*, de acordo com Singleton e Rossi (1965), com adaptações. A um tubo de ensaio foram adicionados 4,2 mL de água destilada, 50 µL de amostra diluída (1:5) e 250 µL de reagente *Folin-Ciocalteu* diluído (1:10). Após 3 minutos, foram adicionados 500 µL de carbonato de sódio a 20%, repousando por uma hora no escuro. Alíquotas de 300 µL foram transferidas para uma microplaca e sua absorbância a 720 nm determinada em espectrofotômetro de microplacas (Epoch, Synergy-Biotek, Winooski, VT, EUA). As concentrações foram calculadas a partir da curva padrão de ácido clorogênico ($y = 0,0008x + 0,0078$; $R^2 = 0,9948$), em que as concentrações variaram de 0 a 200 mg/L. Os resultados foram expressos em miligrama de ácido clorogênico por quilograma de bagaço seco (mg EAC/kg_{b.s.}).

2.2.2.8.2 Análise de compostos fenólicos individuais

Para a identificação e quantificação dos compostos fenólicos individuais, utilizou-se a Cromatografia Líquida de Eficiência (CLAE/HPLC). A análise foi realizada conforme descrito por Alberti *et al.* (2014), com modificações. As amostras de extratos, preparadas com 1,52g de bagaço seco, foram congeladas em ultrafreezer e liofilizadas. Posteriormente, as amostras foram reconstituídas em 2,3 mL de uma solução composta de ácido acético a 2,5% e metanol (3:1, v/v) e filtradas em filtro de seringa 0,22 µm (Nylon) (Waters, Milford, MA, EUA). A fase móvel consistiu em 2,5% de ácido acético (solvente A) e acetonitrila (solvente B). O gradiente aplicado foi:

- 3 - 9% B (0 - 5 minutos),
- 9 - 16% B (5 - 15 minutos),
- 16 - 36,4% B (15 - 33 minutos),

seguido por uma corrida isocrática a 100% de B por 5 minutos e o acondicionamento da coluna a 3% de B por 10 minutos. A vazão foi de 1,0 mL/minuto, o volume de injeção de 10 µL e a temperatura da coluna de 20 °C. A identificação e quantificação dos compostos ocorreram por meio da comparação dos tempos de retenção e espectro com padrões (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Parâmetros cromatográficos de compostos fenólicos analisados por HPLC

Composto Fenólico	TR	Banda UV (nm)	Regressão linear (mg/L)	R ²	LOD*	LOQ*
Ác. Gálico	3,11	271,5	Y=24519x-29541	0,998	0,78	2,35
Ác. Clorogênico	9,212	326,2	Y=25239x-13321	0,997	0,59	1,80
Ác. Cumárico	15,522	310,7	Y=61187x-85345	0,998	0,52	1,59
Ác. Caféico	10,923	323,8	Y=39960x+80223	0,984	0,07	0,20
Catequina	8,713	279,8	Y=5999x-9084	0,999	0,99	3,00
Epicatequina	12,186	279,8	Y=5729X+13748	0,992	3,34	10,13
Procianidina B1	7,08	278,7	Y = 4212,1x-18361	0,997	0,54	1,81
Procianidina B2	10,17	279,8	Y=5684,6x+6661	0,998	0,52	1,58
Floridzina	24,502	285,8	Y=17194x-30986	0,997	1,28	3,86
Floretina	32,356	285,8	Y=34406x-12344	0,999	0,33	0,99
Quercitina	23,482	376,2	Y=19302x-20826	0,998	0,18	0,53
Quercetina-3-Rutinosídeo	18,734	354,9	Y=14303x-72994	0,998	0,50	1,52
Quercetina-3-O-galactosídeo	18,992	354,9	Y=14225x-2367,6	0,999	0,29	0,89
Quercetina-3-β-glicosídeo	19,55	354,9	Y=22090x-59247	0,998	0,03	0,08
Quercetina-3-α-L-arabinofuranosídeo	21,16	353,7	Y=19875x-29203	0,998	0,29	0,89
Quercetina-3-O-Ramnosídeo	21,959	348,9	Y=20504x-34187	0,989	0,15	0,46
Kaempferol	32,791	364,4	Y=28749x+25320	0,999	1,67	5,07
Miricetina	28,456	364,4	Y=24854x-37029	0,990	0,08	0,25

Nota: TR: Tempo de retenção em minutos; Banda UV: expresso em NM; LOQ: limite de quantificação, LOD: limite de detecção; * µg/mL.

Os cálculos foram baseados nas respectivas curvas padrão, com leituras de absorbâncias realizadas a:

- 280 nm (flavan-3-óis e dihidrochalconas),
- 320 nm (ácidos hidroxicinâmicos) e
- 350 nm (flavonóis).

2.2.2.8.3 Determinação de flavonoides - TFC

A quantificação de flavonoides totais foi realizada de acordo com o método descrito por Zhishen, Mengcheng e Jianming (1999), com adaptações. Foram adicionados 250 µL de amostra a tubos de ensaio, juntamente com 2 mL de água deionizada e 120 µL de nitrito de sódio 0,5 mol/L. A mistura foi agitada e deixada em repouso por cinco minutos, na ausência de

luz. Após esse período, foram adicionados 120 µL de cloreto de alumínio a 10%, os tubos foram novamente agitados e mantidos em repouso por cinco minutos. Em seguida, foram adicionados 800 µL de hidróxido de sódio 1 mol/L, a mistura foi agitada e alíquotas de 300 µL foram transferidas para microplaca, onde foram realizadas as leituras de absorbância a 510 nm. As concentrações foram calculadas por meio da curva padrão de catequina ($y = 0,0018x + 0,0064$; $R^2=0,997$), em que as concentrações variaram de 20 a 200 mg/L. Os resultados foram expressos em miligrama de catequina equivalente por quilograma de bagaço seco (mg CAT/kg).

2.2.2.8.4 Determinação da capacidade antioxidante

Para a determinação da Capacidade Antioxidante dos extratos, foram utilizados 3 métodos: ABTS, DPPH e FRAP.

ABTS

É um método de descoloração do cátion, realizado de acordo com Re *et al.* (1999), com adaptações para leitura em microplaca. Primeiramente, foi preparada uma mistura de solução de ABTS (7 mmol/L) e persulfato de potássio (2,45 mmol/L), deixada reagir por 16 horas no escuro. Após, uma alíquota de 4 mL foi transferida para um balão volumétrico e completada até 200 mL com água destilada. Foram adicionados 20 µL de amostra em microplaca; em seguida, foram adicionados 280 µL da mistura diluída de ABTS e persulfato, e a mistura foi deixada reagir por 30 minutos no escuro. Ao final da reação, foi realizada a leitura a um comprimento de onda de 734 nm. A curva padrão, utilizada para os cálculos das concentrações, foi construída com o padrão Trolox ($y = 0,1889x + 1,8324$; $R^2 = 0,986$), em que as concentrações variaram de 0 a 500 µmol/L. Os resultados foram expressos em micromol equivalente de trolox por quilograma de bagaço seco (µmol TE/kg).

DPPH

É um método que se baseia na captura do radical DPPH pelos antioxidantes presentes na amostra. A análise foi realizada de acordo com Brand-Williams; Cuvelier e Berset (1995), com adaptações. Foram colocados em microplaca 10 µL de amostra diluída (1:5) e 190 µL do reagente DPPH diluído 10 vezes (125 µmol/L). A mistura foi deixada em repouso por 30 minutos, na ausência de luz, e a leitura foi realizada a 517 nm. As concentrações foram calculadas através da curva padrão de Trolox ($y = 0,0699x + 0,2555$; $R^2= 0,998$), em que as

concentrações variaram de 50 a 500 $\mu\text{mol/L}$. Os resultados foram expressos em micromol equivalente de Trolox por quilograma de bagaço seco ($\mu\text{mol TE/Kg}$).

FRAP

É um método que analisa o poder antioxidante a partir da redução do ferro. O método aplicado foi descrito por Benzie e Strain (1996), com adaptações. Primeiramente, foi preparada a solução de FRAP, com 10 mM de TPTZ em 40 mM de ácido clorídrico e 20 mM de cloreto férrico (10:1:1). Em seguida, 10 μL de amostra diluída (1:5) foram colocadas na microplaca e adicionados 290 μL da solução FRAP. A mistura foi deixada em repouso por 30 minutos, no escuro. A leitura da absorbância foi realizada a 593 nm. As concentrações foram calculadas através da curva padrão de Trolox ($y = 0,001x + 0,0053$; $R^2 = 0,998$); as concentrações variaram de 100 a 1000 $\mu\text{mol/L}$. Os resultados foram expressos em micromol equivalente de Trolox por quilograma de bagaço seco ($\mu\text{mol TE/kg}$).

2.2.2.9 Análise estatística

Cada análise (TPC, TFC, DPPH, ABTS e FRAF) foi realizada em triplicata, utilizando amostras de lotes distintos. As determinações dos compostos fenólicos individuais foram realizadas em triplicata a partir de um único extrato de cada método de secagem. Todos os resultados foram expressos em relação a base seca do bagaço.

O software utilizado para a análise estatística dos resultados foi o *STATISTICA 8.0* (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA). Os dados foram apresentados como a média $\pm$ desvio padrão de cada variável. Para verificar se houve diferença significativa entre as médias das amostras, foi realizada a análise de variância (ANOVA), precedida pelo teste de homogeneidade de Levene, seguida do teste de Fisher LSD para identificar as diferenças significativas entre as médias das amostras ($p < 0,05$).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Comparação das técnicas e cinética de secagem do bagaço de maçã

A comparação entre as técnicas de secagem, o tempo de processamento e a cinética de secagem, assim como o ajuste à modelagem matemática, são fatores fundamentais para entender e otimizar a eficiência do processo, garantindo a qualidade do produto seco. Neste

estudo, a umidade do bagaço de maçã úmido foi de $79,2 \pm 0,3\%$, conforme apresentado na Tabela 2.3. Após os diferentes processos de secagem, os bagaços apresentaram um teor de umidade residual que variou entre 0,36 e 4,89% (Tabela 2.3), valores abaixo do limite de 10% considerado microbiologicamente seguro para alimentos (Tze *et al.*, 2012).

A eliminação da umidade está diretamente relacionada ao processo de difusão da água do meio interno para a superfície do produto durante a secagem, e cada técnica influencia esse processo de modo diferente (Martins *et al.*, 2020). A diferença significativa nos valores apresentados entre as amostras (Tabela 2.3) reflete a dificuldade enfrentada pelas diferentes técnicas de secagem para a retirada da água, o que impacta a qualidade, a segurança e as características finais do produto. Portanto, escolher uma técnica de secagem adequada para determinada matriz alimentícia é fundamental para minimizar a resistência à transferência de massa, otimizar a remoção da água e preservar as propriedades nutricionais, os compostos bioativos e as características sensoriais (Petikirige; Karim; Millar, 2022).

Tabela 2.3 - Parâmetros de secagem e umidade final das amostras

Amostras	Código das amostras	Condições do processo	Tempo (minutos)	Umidade final (%)
Fresco	-	-	-	$79,2^a \pm 0,3$
Liofilizada	Liofilizada	- 36°C	2.880	$0,4^e \pm 0,1$
Micro-ondas	M7	P7/509 W	~12	$2,4^d \pm 0,2$
	M8	P8/610 W	~12	$3,0^d \pm 0,1$
Secagem convectiva	T 40°C	40°C	480	$4,9^b \pm 0,2$
	T 50°C	50°C	395	$3,9^c \pm 0,6$
	T 60°C	60°C	295	$3,2^{cd} \pm 0,1$

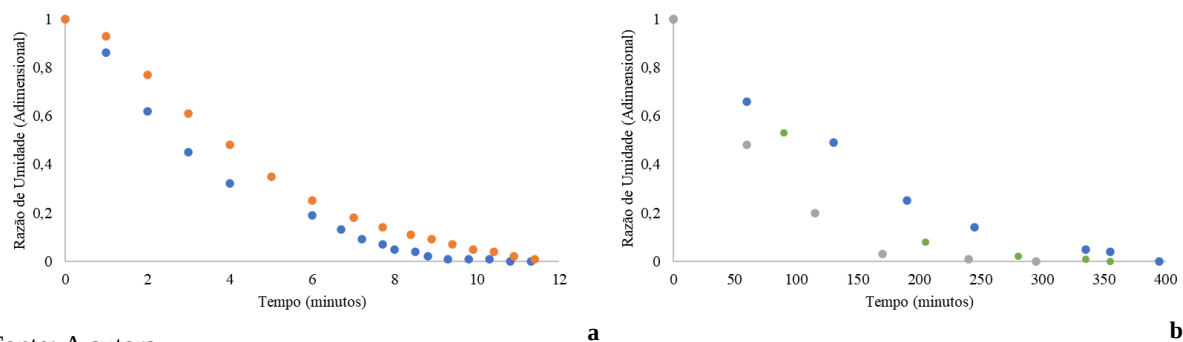
Fonte: A autora

Nota: ^{abc} - letras diferentes dentro da mesma coluna indicam diferenças estatísticas.

O tempo de secagem variou significativamente entre as técnicas empregadas, oscilando entre 12 e 2880 minutos. A liofilização foi o processo mais demorado (2880 minutos), devido à baixa temperatura que, embora preserve e libere melhor os compostos bioativos, acarreta numa evaporação mais lenta da umidade (Zhang *et al.*, 2024). Esse tempo prolongado, contudo, resulta em maior consumo de energia e, consequentemente, custos operacionais mais elevados (Hu *et al.*, 2023; An *et al.*, 2022). Por outro lado, a secagem por micro-ondas se mostrou a técnica mais rápida, com tempo reduzido em 240 vezes em comparação à liofilização, além de menor consumo energético. A superioridade da secagem por micro-ondas mostrou superioridade em termos de tempo, conforme também observado por Hu *et al.* (2023) em estudo com casca de café. Esta constatação corrobora os resultados deste trabalho.

A Figura 2.1 apresenta as diferenças significativas na cinética de secagem entre as técnicas de micro-ondas e estufa de ar quente. A eficiência da transferência de massa e calor depende da temperatura, propriedades do material e do mecanismo de condução térmica. A secagem por micro-ondas é significativamente mais rápida devido ao aquecimento dielétrico e às propriedades dielétricas do material (An *et al.*, 2022; Öztürk; Şakıyan; Özlem Alifakı, 2017). O aquecimento dielétrico gera um campo eletromagnético que induz atrito e vibração molecular, principalmente da água. Isso resulta uma pressão interna e impulsiona a vaporização do interior para o exterior do material (Chandrasekaran; Ramanathan; Basak, 2013; Luka *et al.*, 2023; An *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2017), causando aquecimento intenso e rápido na superfície do material (An *et al.*, 2022), como observado nas secagens a 509W (122,5 °C) e 610W (136,6 °C), que reduziram o tempo total de secagem. Embora energeticamente eficiente, a secagem por micro-ondas pode causar superaquecimentos localizado, comprometendo a qualidade do produto, por exemplo, pela degradação de compostos bioativos e escurecimento (Joardder; Karim, 2023). Para otimizar e minimizar o risco de superaquecimento, é importante controlar parâmetros como potência, frequência, temperatura e velocidade do ar, além de selecionar adequadamente o equipamento e considerar as propriedades do material (An *et al.*, 2022).

Figura 2.1 - Dados experimentais da razão de umidade (adimensional) em função do tempo (minutos) para a secagem do bagaço de maçãs Gala em micro-ondas e estufa de circulação de ar quente



Fonte: A autora

Nota: gráfico (a) corresponde a secagens por micro-ondas e gráfico - pontos azuis: potência 610W e pontos laranjas: potência 509W; (b) secagem por estufa de circulação de ar quente – pontos azuis: temperatura de 40 °C, pontos verdes: temperatura de 50 °C e pontos cinzas: temperatura de 60 °C.

A redução do tempo de secagem pode ser acelerada pelo aumento da potência do micro-ondas, como demonstrado por Luka *et al.* (2023) e Wang *et al.* (2007), que observaram uma correlação significativa entre o aumento das potências aplicadas e a redução do tempo de secagem. No entanto, os resultados deste estudo apresentaram uma observação diferente, mesmo com o aumento da potência, o tempo de secagem permaneceu constante. Essa

divergência pode estar relacionada à variação do teor de umidade, da densidade, a flutuações de temperatura e às propriedades dielétricas do material. A eficiência da secagem por micro-ondas não se limita ao aumento da potência, pois, em determinadas fases do processo, potências mais altas nem sempre aceleram o processo devido às limitações na transferência de massa, tornando essencial o controle otimizado do processo conforme as características específicas do material e o comportamento da secagem (Wang, R. *et al.*, 2022).

Diferentemente do micro-ondas, na estufa de circulação de ar quente, o aquecimento ocorre de fora para dentro, o que pode endurecer a superfície do produto e criar resistência nos tecidos vegetais, dificultando a migração da água para o exterior (Joardder; Karim, 2023). Esse fenômeno reduz a eficiência da remoção da umidade, aumenta o tempo de secagem e compromete a qualidade final do produto.

Na estufa de circulação de ar quente (Gráfico b, Figura 2.1), observou-se que a temperatura teve maior influência. Quanto maior a temperatura, maiores as taxas de transferência de massa, resultando em tempos de secagem mais curtos e alcançando a estabilidade do peso mais rapidamente, afetando a umidade final de cada amostra. Esse comportamento foi corroborado por Wang *et al.* (2007), que concluíram que o aumento da temperatura acelera o processo de secagem e reduz o seu tempo.

Ao comparar as técnicas de secagem por micro-ondas e estufa de circulação de ar quente, verificou-se que o micro-ondas apresentou um processo de secagem significativamente mais rápido e eficiente em termos de tempo (~12 minutos) do que a secagem em estufa de circulação de ar quente (295 – 480 minutos). Este resultado é também foi constatado em estudos anteriores, como o de Alibas e Yilmaz (2022), que ao comparar a secagem de fatias de laranja utilizando ambas as técnicas, constataram que a secagem por micro-ondas foi significativamente mais rápida. Similarmente, Demiray; Seker e Tulek (2017) obtiveram a mesma conclusão ao secarem fatias de cebola. A literatura, portanto, converge para os achados desta pesquisa.

Luka *et al.* (2023) realizaram um estudo sobre a secagem de repolho branco utilizando essas técnicas, e os resultados foram semelhantes: a secagem por micro-ondas demonstrou ser mais rápida em comparação à secagem em estufa de ar quente. Essa constatação reforça que a secagem por micro-ondas é mais rápida e eficiente em relação a técnica convencional estudada, devido à sua capacidade de acelerar o processo de remoção de umidade e reduzir o tempo de processamento e o consumo de energia. Contudo, para que essa técnica seja considerada superior às demais técnicas, é necessário avaliar outros parâmetros além do tempo, como a

qualidade do produto (preservação de compostos bioativos, aparência, textura) e viabilidade industrial.

Essas diferenças entre as técnicas mostram que o micro-ondas pode ser mais eficaz em relação ao tempo, embora a estufa de ar também apresente suas vantagens específicas, que dependem do tipo e do uso do produto seco. Portanto, ao escolher a técnica ideal, é importante considerar a eficiência energética e a preservação dos compostos que se pretende manter no alimento.

2.3.2 Modelagem matemática e ajuste das curvas de secagem

Os dados obtidos foram submetidos a uma análise comparativa entre quatro modelos matemáticos, detalhados na Tabela 2.4, para identificar o modelo que melhor se ajusta aos processos realizados. Todos os modelos foram capazes de prever o comportamento de secagem com precisão, apresentando coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,970 e desvios quadrados médios (DQM) inferiores a 0,10. Isso indica que os modelos matemáticos estudados demonstraram precisão na simulação da secagem do bagaço de maçã, tanto em estufa de ar quente e micro-ondas. Assim, os ajustes a modelos matemáticos ajudam na compreensão dos mecanismos de transferência de massa e calor, permitindo a previsão do processo, o controle das condições operacionais, como prever o tempo de secagem (Araújo *et al.*, 2024).

Embora todos os modelos tenham apresentado resultados satisfatórios, o modelo Midilli-Kucuk foi o que se destacou na maioria das técnicas de secagem, exceto na secagem em estufa a 60 °C. Os valores de R^2 variaram de 0,988 a 0,999 e os DQM de 0,016 a 0,053, o que indica o melhor ajuste para a modelagem de Midilli-Kucuk. Para a secagem em estufa a 60 °C, o modelo de Page foi o mais adequado, com valores de 0,998 para R^2 e 0,022 para DQM. O modelo de Newton, por sua vez, foi o que apresentou desempenho inferior sob as condições estudadas, indo de encontro com os resultados encontrados por Musielak; Mieszczańska-Frąc; Mierzwa (2024). A Figura 2.2 ilustra a distribuição dos pontos observados e a adequação aos modelos que exibiram os melhores ajustes. Como observado nos gráficos (a, b, c, d) da Figura 2.2, as curvas geradas pelo Modelo Midilli-Kucuk apresentaram um ajuste adequado, podendo descrever o método de secagem para a maioria das técnicas de secagem do bagaço de maçã.

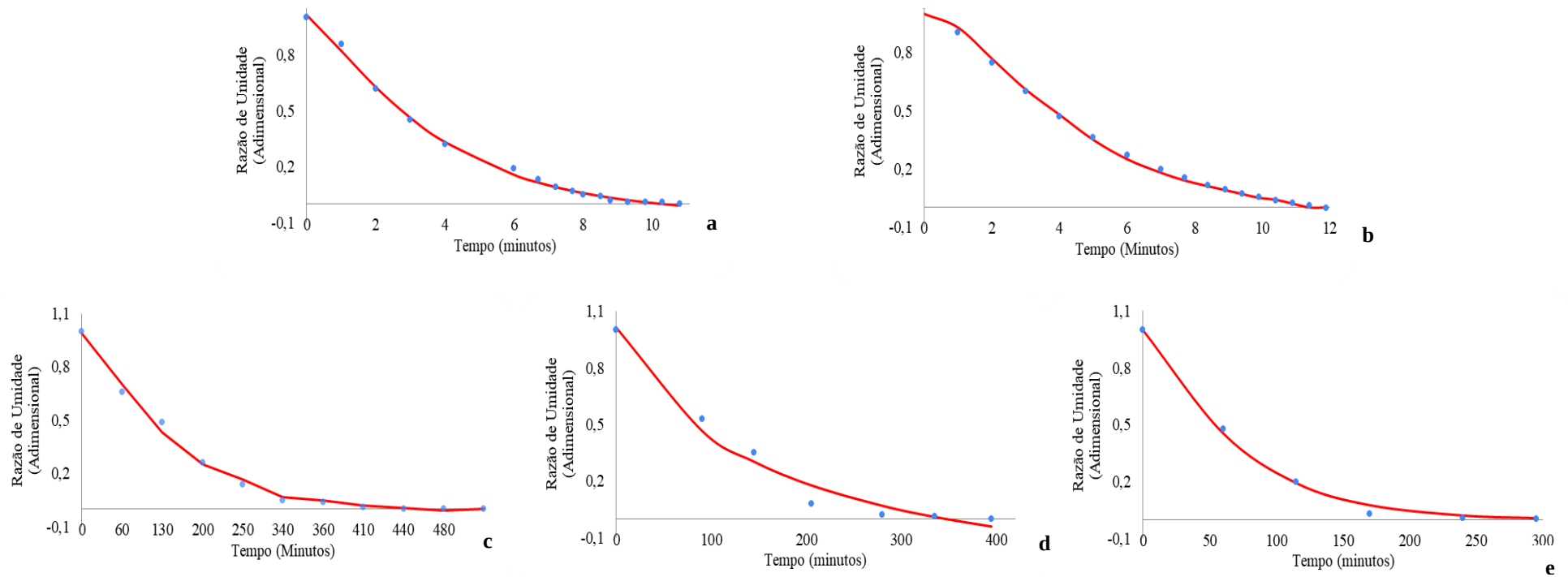
Tabela 2.4 - Parâmetros dos modelos matemáticos na secagem de bagaço de maçã em micro-ondas nas potências 509W e 610W e estufa de circulação de ar quente a temperaturas de 40 °C, 50° C e 60 °C

Modelo/Método	a	K (s ⁻¹)	n	b	R ²	DQM
Page						
M 7	-	0,000834	1,314476	-	0,998	0,018
M 8	-	0,000414	1,373641	-	0,998	0,020
T 40 °C	-	0,000344	0,886883	-	0,995	0,046
T 50 °C	-	0,000346	0,906676	-	0,980	0,069
T 60 °C	-	0,000069	1,139929	-	0,998	0,022
Midilli-Kucuk						
M 7	1,017333	0,001569	1,19034	-0,000058	0,999	0,016
M 8	1,042676	0,000845	1,240497	-0,000080	0,999	0,015
T 40 °C	1,019852	0,000786	0,765815	-0,000008	0,995	0,035
T 50 °C	1,016128	0,000512	0,842197	-0,000005	0,988	0,053
T 60 °C	1,010366	0,000562	0,889954	-0,000003	0,996	0,034
Henderson e Pabis						
M 7	1,076892	0,005232	-	-	0,991	0,041
M 8	1,119413	0,004095	-	-	0,985	0,057
T 40 °C	1,0346	0,000122	-	-	0,991	0,045
T 50 °C	1,025696	0,000148	-	-	0,986	0,059
T 60 °C	1,014026	0,000237	-	-	0,996	0,034
Newton						
M 7	-	0,004932	-	-	0,988	0,048
M 8	-	0,003735	-	-	0,978	0,068
T 40 °C	-	0,000119	-	-	0,991	0,046
T 50 °C	-	0,000146	-	-	0,985	0,060
T 60 °C	-	0,000235	-	-	0,995	0,034

Fonte: A autora

Notas: K: constante de secagem; a, n e b: coeficiente de secagem; R²: coeficiente de regressão; DQM: Desvio quadrado médio.

Figura 2.2 - Modelagem em relação a razão de umidade (adimensional) no processo de secagem do bagaço de maçã em micro-ondas 509W e 610W, e estufa de circulação de ar a 40 °C, 50 °C e 60 °C



Fonte: A autora

Nota: marcações em azul correspondem aos valores observados e as marcações em linhas vermelhas correspondem aos valores preditos. **(a)** Ajuste *Midilli-Kucuk* para secagem em micro-ondas potência de 509W; **(b)** Ajuste *Midilli-Kucuk* para secagem micro-ondas potência de 610W; **(c)** Ajuste *Midilli-Kucuk* para secagem em estufa de circulação de ar quente 40 °C; **(d)** Ajuste *Midilli-Kucuk* para secagem em estufa de circulação de ar quente 50 °C; e **(e)** Ajuste *Page* para secagem em estufa de circulação de ar quente 60 °C.

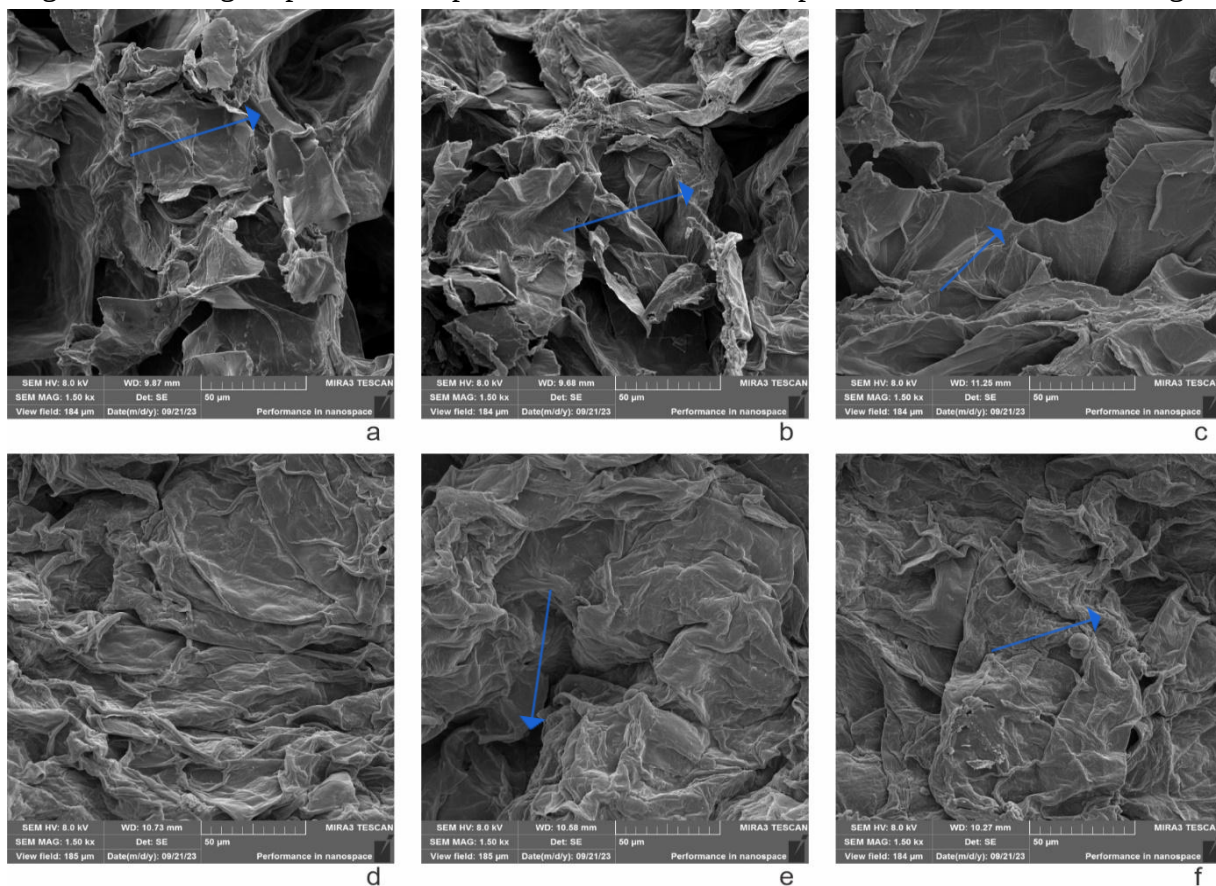
De forma similar à presente pesquisa, durante um estudo de secagem com infravermelho de fatias de maçã, todos os modelos matemáticos utilizados se ajustaram ao processo, mas o modelo Midilli-Kucuk foi o que melhor explicou a ação de secagem (El-Mesery *et al.*, 2024). Isso evidencia a aplicabilidade e a precisão do modelo em diferentes estudos com maçãs, reforçando sua importância para a área, podendo ser um modelo padrão para a cinética de secagem em bagaços de maçã, contribuindo para a otimização de processos na indústria de alimentos.

2.3.3 Análise e avaliação de características morfológicas utilizando microscopia eletrônica de varredura - MEV

As imagens capturadas, conforme mostrado na Figura 2.3, revelaram alterações estruturais resultantes das diversas técnicas de secagem empregadas. Essas alterações estruturais são irreversíveis e pode comprometer a extração de compostos bioativos (An *et al.*, 2022).

O bagaço de maçã, de modo geral, apresenta uma estrutura porosa, fibrosa e irregular (Bhat *et al.*, 2023). As amostras secas pelo método convencional em estufa com circulação de ar quente (Figura 2.3d, e, f) demonstraram maior densidade e menor formação de cavidades, especialmente aquelas desidratadas a 40 °C (Figura 2.3d). Esses resultados também foram achados por An *et al.* (2022), que, por meio de microscopia eletrônica, observaram maior compactação e encolhimento celular no edamame submetido a secagem por ar quente, trazendo uma maior dureza ao material. Esse fenômeno, é decorrente da contração dos tecidos celulares durante a secagem térmica, causando o encolhimento do material e não formação de poros (Joardder; Karim, 2023; Hu *et al.*, 2023), dificultando a extração de compostos fenólicos. A Figura 2.1c (secagem por micro-ondas em maior potência) apresenta uma estrutura diferenciada, possivelmente devido ao colapso celular. Como demonstrado por Joardder e Karim (2023), temperaturas de 140 °C por 8 minutos causam queimaduras e colapso celular, e que a amostra em questão atingiu mais de 136 °C em 12 minutos.

Figura 2.3 - Imagens por microscopia eletrônica de varredura por diversos métodos de secagem



Fonte: A autora

Nota: **(a)** secagem por liofilização; **(b)** secagem em micro-ondas 509W; **(c)** secagem micro-ondas 610W; **(d)** secagem em estufa de circulação de ar quente 40 °C; **(e)** secagem em estufa de circulação de ar quente 50 °C; e **(f)** secagem em estufa de circulação de ar quente 60 °C. —> Indicação das cavidades formadas durante os diversos métodos de secagem. Ampliação: 1.500 vezes; detector utilizado: elétrons secundários.

Em contraste, as amostras que passaram pelo processo de liofilização (Figura 2.3a) ou secagem por micro-ondas (Figura 2.1b) demonstraram uma estrutura mais porosa, possuindo uma maior quantidade de poros, o que pode facilitar a extração dos compostos bioativos, especialmente naquelas liofilizadas. Este fenômeno pode ser atribuído a retirada de umidade interna sem causar danos às células, mantendo a estrutura intacta. O estudo de An *et al.* (2022) também constatou que a liofilização proporcionou maior integridade celular, menor encolhimento, e uma estrutura porosa mais uniforme e numerosas, sugerindo um aumento no rendimento de bioativos extraídos. Tal processo pode ser explicado por dois fatores principais: a baixa temperatura em condições de vácuo durante a liofilização, que faz com que os cristais de gelo se transformem em vapor, sem causar danos às células; e a rápida remoção de umidade por vaporização nas amostras secas em forno micro-ondas também contribui para a formação de poros (Joardder; Karim, 2023; Hu *et al.*, 2023).

Mas se o processo do micro-ondas não for bem controlado, esse vapor formado internamente causa um aumento significativo da pressão, aumentando a migração da água para o exterior e causando alterações estruturais como inchaço, deformação e até a ruptura da parede celular (Joardder; Karim, 2023). Ao comparar as imagens da Figura 2.3 com os dados de umidade da Tabela 2.2, notou-se que a formação de cavidades nas estruturas está associada às amostras com menor teor de umidade, pois, quanto maior o número de poros, mais fácil será a migração da água para o exterior do material. Essa tendência foi corroborada por Hu *et al.* (2023) em sua pesquisa sobre diversas técnicas de secagem aplicadas à casca de café.

2.3.4 Análise das alterações das características visuais e nas coordenadas de cor

A cor desempenha um papel importante na percepção sensorial dos alimentos. A análise das amostras de bagaço de maçã secas pelas diferentes técnicas revelou variações significativas nas coordenadas de cor (Tabela 2.5). As características visuais dos bagaços secos por cada técnica são apresentadas na Figura 2.4.

Tabela 2.5 - Parâmetros de cor das amostras de bagaço de maçã secos

Amostras	L*	a*	b*	Chroma	Ângulo Hue
Liofilização	64,1 ^a ± 0,3	10,5 ^e ± 0,1	28,2 ^b ± 0,1	30,7 ^b ± 0,1	69,6 ^a ± 0,2
M 7	43,2 ^c ± 0,3	12,2 ^c ± 0,1	26,7 ^c ± 0,2	29,3 ^c ± 0,2	65,4 ^d ± 0,2
M 8	35,6 ^e ± 0,4	10,6 ^e ± 0,1	23,9 ^e ± 0,4	26,2 ^e ± 0,4	66,1 ^c ± 0,2
T 40 °C	34,7 ^f ± 0,1	13,4 ^a ± 0,1	26,7 ^c ± 0,1	29,8 ^b ± 0,1	63,4 ^e ± 0,1
T 50 °C	55,2 ^b ± 0,1	11,9 ^d ± 0,1	29,4 ^a ± 0,1	31,7 ^a ± 0,1	68,0 ^b ± 0,1
T 60 °C	37,7 ^d ± 0,2	13,1 ^b ± 0,2	25,0 ^d ± 0,1	28,2 ^d ± 0,2	62,3 ^f ± 0,2

Fonte: A autora

Nota: ^{abc} - letras diferentes dentro da mesma coluna indicam diferenças estatísticas

Em relação aos parâmetros de cor, a análise das amostras revelou que a secagem por liofilização resultou em maior luminosidade (L*), enquanto as técnicas de convecção a 40 °C e 60 °C e por micro-ondas (M8) apresentaram os menores valores de L*. Esse fenômeno é demonstrado por Afrin; Acharjee e Sit (2022), que estudaram a secagem do bagaço de laranja e encontraram um aumento inicial na luminosidade entre a temperatura de 50 e 60 °C, seguido por uma diminuição na luminosidade com o aumento da temperatura para 70 °C. Esses achados na variação da luminosidade podem estar relacionados à reação de *Maillard*, que ocorre em temperaturas mais elevadas, escurecendo o produto (Afrin; Acharjee; Sit, 2022). Outros resultados semelhantes foram observados em estudos sobre bagaço de pera (Krajewska *et al.*, 2024) e bagaço de cenoura, onde a liofilização apresentou maiores valores para L* em comparação com as secagens por ar quente e micro-ondas (Polat *et al.*, 2022).

Quanto ao eixo a^* (vermelho-verde), a amostra seca por convecção a 40 °C apresentou o maior valor, indicando uma tonalidade mais avermelhada. Por outro lado, a liofilização resultou no menor valor, sugerindo uma coloração menos avermelhada. No eixo b^* (amarelo-azul), a secagem por convecção a 50 °C deixou a amostra mais amarelada, seguida pela amostra liofilizada. Em contraste, a secagem do M8 resultou em um valor menor para esse eixo, indicando que a amostra é menos amarela. Esses achados divergem dos resultados encontrados por Polat *et al.* (2022), onde as amostras liofilizadas apresentaram maiores valores para vermelho e amarelo, enquanto os menores valores foram observados nas amostras secas por convecção. A secagem por micro-ondas, para a amostra M7, assim como para Polat *et al.* (2022), mostrou valores intermediários para todos os parâmetros de cor, posicionando-se entre as técnicas de convecção e liofilização em relação ao impacto da secagem na coloração das amostras. O mesmo não ocorreu com a amostra M8, na qual todos os parâmetros foram inferiores aos das demais técnicas de secagem.

Os resultados de *Chroma* estão relacionados à saturação da cor percebida pelos seres humanos, podendo ser descrita como opacidade ou vivacidade. Houve diferença significativa entre todas as amostras, com a saturação classificada na ordem $T\ 50\ ^\circ C > \text{Liof.} = T\ 40\ ^\circ C > M7 > T\ 60\ ^\circ C > M8$, onde $T50\ ^\circ C$ apresentou maior vivacidade e a M8 apresentou maior opacidade. O ângulo *Hue* de todas as amostras apresentou diferença significativa, mas todas ficaram entre os ângulos 60° e 70° , associados a cores mais acentuadas, como vermelho-amarelo. A liofilização apresentou uma cor mais amarelada, enquanto a secagem com ar quente a $60\ ^\circ C$ foi a que apresentou o menor ângulo, aproximando-se do laranja. Assim, observou-se que o processo de secagem pode causar alterações significativas na cor do bagaço, mas essas mudanças dependem de cada técnica aplicada e podem interferir nas características sensoriais e, consequentemente, na aceitação do produto.

As observações visuais (Figura 2.4) mostraram que a coloração do bagaço de maçã variou de acordo com a técnica de processamento empregada. O bagaço liofilizado (Figura 2.4a) apresentou tonalidade mais clara, enquanto as demais amostras exibiram tons amarronzados, sendo mais intensos nas amostras submetidas a maior potência e temperatura. Essas diferenças de cor são atribuíveis às diferentes condições térmicas de secagem. Observações semelhantes foram relatadas por Hu *et al.* (2023).

Figura 2.4 - Representação das cores das amostras a partir nas coordenadas colorimétricas obtidas por espectrofotometria (A) e imagens dos bagaços secos (B) em diferentes técnicas de secagem



Fonte: A autora. A imagem A foi elaborada com auxílio do site: <https://colordesigner.io/convert/labtorgb>. A imagem B são fotos dos bagaço de maçã secos após retirados do equipamento de secagem, exceto a foto e que o bagaço já havia sido triturado.

Nota: (a) Liofilizada; (b) Micro-ondas 509W; (c) Micro-ondas 600W; (d) Estufa de circulação de ar a 40 °C; (e) Estufa de circulação de ar a 50 °C; e (f) Estufa de circulação de ar a 60 °C.

Essas variações na cor dos bagaços obtidos com diferentes técnicas de secagem resultam da interação de diversos fatores. Reações como de *Maillard*, a degradação de pigmentos, o escurecimento enzimático e a oxidação de compostos fenólicos contribuem para o escurecimento, intensificado por tempos de secagem mais longos e temperaturas mais elevadas (Heras-Ramírez *et al.*, 2012; Kahraman *et al.*, 2021; Krokida; Maroulis; Saravacos, 2001). Essa interação leva a modificações significativas na coloração, conforme observado.

2.3.5 Caracterização dos extratos

A análise dos resultados (Tabela 2.6) indicou diferenças significativas entre as amostras, evidenciando a influência das técnicas de secagem e das variáveis de processamento (potência e temperatura) nas características fenólicas e na capacidade antioxidante dos extratos. A liofilização foi a técnica mais eficiente, resultando em maiores concentrações de compostos fenólicos totais (TPC) e flavonoides (TFC), teores de 3513 mg CAE/kg e 1157 mg CAT/kg, respectivamente. Além de uma capacidade antioxidante superior às demais técnicas, principalmente pelo método DPPH (21344 $\mu\text{mol TE/kg}$). Esses resultados também foram encontrados na literatura (Albuquerque *et al.*, 2024; Kahraman *et al.*, 2021; Wojdyło *et al.*, 2016). Esses resultados podem estar relacionados a formação de cristais de gelo formados pelo processo de liofilização e que criam cavidades maiores durante o processo de remoção da água, facilitando a extração dos compostos fenólicos pelos solventes (Hu *et al.*, 2023). Além disso,

as baixas temperaturas e a sublimação lenta não degradam esses compostos que são termolábeis (Albuquerque *et al.*, 2024; Hu *et al.*, 2023).

Em contraste, as técnicas secagens em estufa de circulação de ar nas temperaturas de 40 °C e 60 °C apresentaram resultados inferiores. Temperaturas mais elevadas (como 60 °C) e tempos de exposição prolongados podem levar à degradação dos compostos fenólicos e reduzir a capacidade antioxidante (Henríquez *et al.*, 2014; Kahraman *et al.*, 2021; Vega-Gálvez *et al.*, 2012; Wojdyło *et al.*, 2016). Temperaturas moderadas (como 40 °C), embora reduzam o risco de degradação dos compostos bioativos, elas também limitam a sua extração por solventes. Isso se deve à formação de uma estrutura mais compacta, com poros menores e em menor quantidade (ElGamal *et al.*, 2023; Joardder; Karim, 2023; Kahraman *et al.*, 2021). Além disso, temperaturas abaixo de 50 °C são insuficientes para inativar enzimas oxidativas, levando à oxidação dos compostos fenólicos e, conseqüentemente, à redução da concentração de compostos fenólicos totais (TPC) (Llavata *et al.*, 2022).

Em um estudo sobre diferentes técnicas de secagem aplicadas a *Ziziphus jujuba* Mill., Sapkota *et al.* (2023) concluíram que a liofilização preserva melhor os teores de fenólicos totais e a capacidade antioxidante em comparação com estufas de circulação de ar, especialmente a 60 °C. Soares *et al.* (2008) também analisaram compostos fenólicos e atividade antioxidante do bagaço de maçã cv Gala e os valores encontrados (4672,4 e 5227,4 mg GAE/kg) foram superiores aos da pesquisa atual, possivelmente devido à forma de expressão dos resultados em ácido gálico e a outros fatores, como o solvente utilizado. Na mesma pesquisa, foi feita uma comparação entre outros tipos de solventes, evidenciando diferenças estatísticas significativas entre eles, com os valores variando de 1344,5 a 5227,4 mg GAE/kg, dependendo do solvente utilizado (Soares *et al.*, 2008). Similarmente, a liofilização também maximizou a extração de compostos bioativos, além da maior atividade antioxidante em edamame (An *et al.*, 2022).

O conteúdo de fenóis totais está diretamente relacionado à capacidade antioxidante. Assim, o comportamento dos resultados da capacidade antioxidante foi semelhante aos dos fenóis totais. Os maiores resultados foram encontrados para a liofilização, enquanto os menores valores foram encontrados na secagem por estufa a 60 °C, estando consoante aos achados de Sapkota *et al.* (2023). Albuquerque *et al.* (2024) também encontraram valores de fenólicos mais altos para a casca de manga seca por liofilização, concluindo que isso acontece devido à baixa temperatura e à sublimação suave. Além disso, o estudo demonstrou uma correlação positiva ($r = 0,88$) entre o teor de flavonoides totais e a capacidade antioxidante, medida pelo método FRAP.

Tabela 2.6 - Concentração de fenóis totais (mg CAE/kg), flavonoides totais (mg CAT/kg), capacidade antioxidante ($\mu\text{mol TE/kg}$) pelos métodos de ABTS, DPPH e FRAP e perfil de fenólicos individuais (mg/kg) nos extratos das diferentes técnicas de secagem

Amostras	Liofilização	M 7	M 8	T 40 °C	T 50 °C	T 60 °C
Compostos fenólicos						
Fenóis Totais	3513 ^a ± 62	3631 ^a ± 186	2461 ^c ± 121	1835 ^d ± 100	2957 ^b ± 38	2308 ^c ± 52
Flavonoides	1157 ^b ± 68	820 ^c ± 44	1099 ^b ± 83	504 ^d ± 38	1361 ^a ± 106	1455 ^a ± 36
Atividade Antioxidante						
ABTS	3791 ^b ± 38	3946 ^a ± 12	3915 ^a ± 49	3889 ^a ± 69	3138 ^d ± 30	3687 ^c ± 80
DPPH	21344 ^a ± 1180	17433 ^b ± 633	21170 ^a ± 1130	15235 ^c ± 826	19956 ^a ± 1493	8907 ^d ± 484
FRAP	13751 ^b ± 441	15923 ^a ± 561	11134 ^c ± 793	8188 ^d ± 729	15071 ^a ± 199	8039 ^d ± 557
Fenóis Individuais						
Σ Ácidos fenólicos	67,4	87,5	32,0	33,7	17,9	23,9
Ácido Clorogênico	67,4 ^b ± 2,5	87,5 ^a ± 5,6	32,0 ^c ± 0,5	33,7 ^c ± 0,1	17,9 ^c ± 0,1	23,9 ^d ± 2,3
Σ Flavonoides	214,3	132,3	76,6	112,4	54,1	68,8
Σ Flavan-3-óis	90,8	57,6	62,2	50,0	32,5	38,0
Catequina	36,0 ^a ± 2,1	<LOD	19,2 ^b ± 0,5	<LOD	<LOD	<LOD
Procianidina B1	54,8 ^a ± 3,6	57,6 ^a ± 6,3	43,0 ^b ± 0,5	33,9 ^c ± 0,1	32,5 ^c ± 2,6	30,9 ^c ± 2,3
Procianidina B2	<LOQ	<LOD	<LOD	16,1 ^a ± 0,1	<LOD	7,1 ^b ± 0,1
Σ Dihidrochalconas	71,9	64,2	14,4	42,2	21,6	25,0
Floridzina	71,9 ^a ± 0,9	64,2 ^b ± 6,6	14,4 ^e ± 0,1	42,2 ^c ± 0,2	21,6 ^d ± 0	25,0 ^d ± 0,1
Σ Flavonóis	51,6	10,5	<LOD	20,2	<LOQ	5,8
Quercetina-3-Rutinósideo	16,2 ^a ± 0,9	<LOD	<LOD	11,4 ^b ± 0	<LOD	<LOD
Quercitina-3- β -glicosídeo	25,3 ^a ± 0,4	<LOD	<LOD	8,8 ^b ± 0	<LOD	5,8 ^c ± 0,1
Quercitina-3-O-ramnosídeo	10,1 ± 0,2	10,5 ± 0,7	<LOD	<LOD	<LOD	<LOQ

Fonte: A autora

Nota: M7: Extrato com bagaço seco por micro-ondas 509W; M8: Extrato com bagaço seco por micro-ondas 610W; T 40 °C: Extrato com bagaço seco por estufa de circulação de ar quente a 40 °C; T 50 °C: Extrato com bagaço seco por estufa de circulação de ar quente a 50 °C; T 60 °C: Extrato com bagaço seco por estufa de circulação de ar quente a 60 °C. ^{abc} - letras diferentes dentro da mesma linha indicam diferenças estatísticas ($p < 0,05$); -< LOQ: concentração menor que o limite de quantificação do método; <LOD: concentração menor que o limite de detecção do método.

Os teores de flavonoides também foram significativamente afetados pelos tipos de secagem, conforme apresentado na Tabela 2.6. No entanto, essa tendência não foi a mesma observada para os fenóis totais. As amostras secas por estufa com circulação de ar a 50 °C e 60 °C apresentaram melhor desempenho na extração dos flavonoides. De acordo com Ni *et al.* (2024), as diferentes técnicas de secagem têm ações distintas sobre os flavonoides, envolvendo as vias de catálise enzimática e térmica. Dessa forma, é possível que temperaturas mais elevadas tenham contribuído para a quebra das ligações glicosídicas, liberando alguns flavonoides nas amostras secas por estufa com circulação de ar a 50 °C e 60 °C e no micro-ondas com potência 610 W. Como observado, o teor de fenóis e flavonoides não apresentou o mesmo padrão nos resultados, demonstrando que são afetados de forma diferente conforme a temperatura de secagem aplicada, podendo variar o ponto ótimo de acordo com cada classe de compostos fenólicos (ElGamal *et al.*, 2023).

A análise individual dos compostos fenólicos revelou a presença dos seguintes grupos, como ácidos hidroxicinâmicos (ácido 5-cafeoilquinico), flavan-3-óis e procianidinas (catequina, procianidina B1 e procianidina B2), dihidrochalconas (floridzina), flavonóis (rutina, quercetina-3- β -glicosídeo e quercetina-3-*O*-ramnosídeo). A variação nos compostos fenólicos individuais foi observada entre os diferentes tipos de secagem aplicados. O ácido clorogênico e a floridzina foram os compostos encontrados em maior proporção, representando 22,2% - 39,1% e 13,3% – 29,2%, respectivamente. Por outro lado, a procianidina B2 foi o composto menos detectado entre as amostras, variando de não detectado a 10,7%. Esses resultados estão em consonância com os achados de Hobbi *et al.* (2023). No estudo de Llavata *et al.* (2023), foi identificada a floridzina como um dos fenólicos mais abundantes, em concentrações que variaram entre 137 e 801 mg/kg. Já no estudo de Kruczek *et al.* (2023), o ácido clorogênico foi o mais abundante entre os fenólicos individuais.

Os flavan-3-óis são os compostos predominantes no bagaço de maçã, e sua presença variou conforme a técnica de secagem utilizada. O extrato de bagaço de maçã seco em estufa de circulação de ar a 50 °C apresentou concentração de 32,5 mg/kg, enquanto o extrato obtido por liofilização alcançou 90,8 mg/kg. Para Fernandes *et al.* (2019), essa classe também foi a mais predominante, correspondendo a 58% dos compostos presentes. A liofilização resultou na maior diversidade desses compostos, bem como nas maiores quantidades de floridzina e ácido clorogênico (71,9 e 67,4 mg/kg, respectivamente). No entanto, apesar de ser um extrato rico em compostos bioativos, os valores encontrados estão abaixo dos descritos por Benvenuti *et al.*

(2019). Parte desses compostos também estava presente no estudo sobre bagaço de maçã de Li, W. *et al.* (2020), mas em quantidades diferentes.

Conforme observado, a composição de compostos bioativos em amostras varia significativamente em função de diversos fatores. É relevante destacar que as etapas de processamento, incluindo técnicas de secagem e extração, escolha de solventes, manuseio e armazenamento, podem influenciar diretamente a concentração desses compostos na amostra (Li, W. *et al.*, 2020). Além disso, características da matéria-prima, como variedade da fruta, tipo de tecido, estágio de maturação, condições climáticas e agronômicas, região de cultivo e época da colheita, também exercem grande impacto na disponibilidade dos compostos bioativos, resultando em variações consideráveis nos resultados (Alberti *et al.*, 2017; Kruczek *et al.*, 2023; Li, W. *et al.*, 2020).

Assim como neste estudo, Zardo *et al.* (2021) não identificaram alguns compostos fenólicos no bagaço de maçã, incluindo ácido gálico, catequina, floretina, ácido cafeico, ácido cumárico, mirecetina e kaempferol. Essa falta de detecção pode ser atribuída à oxidação enzimática durante os processos de secagem, conforme sugerido por Hobbi *et al.* (2023). Os compostos recuperados na extração com o ponto ótimo e etanol na pesquisa de Zardo *et al.* (2021) foram os mesmos encontrados na pesquisa atual, porém em concentrações diferentes.

O extrato obtido por liofilização se destacou por apresentar maior quantidade de flavonoides totais e elevada concentração de ácidos fenólicos, seguido pelo extrato obtido por secagem em micro-ondas a 509 W. Esses resultados estão em concordância com as análises de capacidade antioxidante e de compostos fenólicos individuais, conforme demonstrados na Tabela 2.6 e corroboram com as imagens de microscopia eletrônica de varredura, que indicam que a amostra liofilizada apresenta mais cavidades, facilitando a extração dos compostos bioativos. Mas, apesar dos benefícios em termos de preservação dos compostos bioativos, a liofilização apresentou um tempo de secagem significativamente mais elevado que o processo de secagem por micro-ondas, que foi mais rápido.

2.4 CONCLUSÃO

Este estudo comparou a eficiência de três técnicas de secagem (liofilização, micro-ondas e estufa de circulação de ar quente) nas propriedades do bagaço de maçã Gala. Foram avaliados a modelagem matemática do processo, as propriedades físicas, os componentes bioativos e a capacidade antioxidante do material seco. Observou-se diferenças significativas

na qualidade do bagaço de maçã em função da técnica e das condições operacionais, como temperatura e potência.

A secagem por micro-ondas e por estufa de ar quente permitiu o ajuste de modelos matemáticos semiteóricos. O modelo de Midilli-Kucuk apresentou o melhor ajuste, tornando-se uma ferramenta adequada para a simulação, otimização e dimensionamento de processos de secagem desse resíduo.

As diferentes técnicas de secagem afetaram significativamente as propriedades físicas, como a umidade e cor, além da microestrutura, do conteúdo de compostos fenólicos e da capacidade antioxidantes do bagaço. A secagem em estufa a 50 °C apresentou o melhor desempenho dentro dessa técnica, embora tenha demonstrado resultados inferiores à liofilização e à secagem por micro-ondas em termos de extração dos compostos fenólicos. No entanto, por ser mais acessível, de operação simples e baixo custo, pode ser uma alternativa viável, dependendo das necessidades do produto e restrições do processo.

A liofilização, apesar do maior tempo de secagem, mostrou-se a técnica mais eficiente para a extração de compostos fenólicos e preservação da capacidade antioxidante do bagaço de maçã. A microscopia revelou a formação de poros maiores, facilitando a difusão dos solventes nessa técnica. Já a secagem por micro-ondas a 509 W representou a segunda melhor opção, otimizando o tempo de processamento sem prejuízos significativos ao perfil de compostos bioativos. Embora tenha apresentado menor teor de flavonoides totais, essa técnica configura-se como uma alternativa viável para a indústria alimentícia, desde que adaptada para equipamentos industriais.

Portanto, a seleção adequada da técnica de secagem é fundamental para preservar e otimizar a extração dos compostos fenólicos do bagaço de maçã, garantindo a qualidade do produto. A escolha da metodologia deve considerar não apenas a eficiência na preservação desses compostos, mas também aspectos como custo, viabilidade industrial e a finalidade do material seco. Desta forma, é possível alinhar qualidade, tempo, praticidade e custos, atendendo às demandas específicas e contribuindo para o aproveitamento sustentável deste subproduto.

CAPÍTULO 3 – VIABILIDADE DO MOSTO ARTIFICIAL E DOS COMPOSTOS FENÓLICOS NA FERMENTAÇÃO E FORMAÇÃO DE AROMAS EM SIDRA ARTIFICIAIS

RESUMO

A sidra apresenta um aroma característico, determinado pelo perfil de compostos voláteis, influenciado por diversos compostos, como os compostos fenólicos presentes no mosto. Este estudo investigou a reprodução desses aromas em sidra por meio da fermentação alcoólica de um mosto artificial, contendo adições de floridzina (SAII), ácido clorogênico (SAIII) e extrato de compostos fenólicos (SAIV e SAV). Avaliou-se o impacto de desses fenóis na cinética de fermentação, na coloração, na composição fenólica e antioxidante, e no perfil aromático volátil. Os resultados demonstraram que as adições impactaram significativamente essas características. A concentração de compostos fenólicos aumentou de 11,9 mg CAE/L na amostra controle (SAI) para 56,6 mg CAE/L (SAIV) e 111,8 mg CAE/L (SAV). O maior teor de flavonoides totais foi observado em SAV (80,6 mg CAT/L), enquanto SAI e SAII não apresentaram flavonoides detectáveis. A análise colorimétrica revelou variações na luminosidade (L^* entre 97,6 e 100) e no ângulo *hue* (80,9 a 161,2). As amostras enriquecidas apresentaram maior *chroma* (5,0 e 5,8) e b^* (5,0 e 5,8), indicando maior intensidade de cor. Foram identificados 25 compostos voláteis, sendo 75% ésteres. As sidras enriquecidas com extratos fenólicos apresentaram 18 desses compostos, com maior concentração e diversidade. O ácido clorogênico influenciou positivamente o perfil volátil, aumentando a concentração de compostos como caprilato de etila e acetato de propila. Os resultados indicaram que o uso do mosto artificial foi eficiente para analisar a fermentação e a influência dos compostos fenólicos na formação dos compostos voláteis de aromáticos da sidra. Os resultados demonstram a importância dos compostos fenólicos no desenvolvimento do aroma, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias que otimizem a utilização do bagaço de maçã para aprimorar do aroma da bebida.

Palavras-chave: Cinética de fermentação. Compostos voláteis. Extratos fenólicos. Aroma. Perfil aromático.

3.1 INTRODUÇÃO

Os compostos fenólicos constituem os principais compostos bioativos das plantas, classificados como metabólitos secundários (Li, Y. *et al.*, 2020). A concentração desses compostos está associada ao estresse e ao crescimento, sendo sua principal função a proteção (Li, Y. *et al.*, 2020). Devido às suas propriedades, os polifenóis também trazem benefícios à saúde humana (Kumar; Goel, 2019; Leonard *et al.*, 2021; Li, Y. *et al.*, 2020). Estudos associam o seu consumo a diversos benefícios, tais como a redução do risco de doenças cardiovasculares, propriedades anticancerígenas, antiobesidade e anti-inflamatórias (Bondonno *et al.*, 2017; Leonard *et al.*, 2021; Marhuenda *et al.*, 2019).

Em decorrência de suas características, esse tipo de composto também pode ser associado à inovação na ciência de alimentos (Kumar; Goel, 2019; Li, Y. *et al.*, 2020). Tais compostos auxiliam na prevenção da oxidação de lipídios e outros componentes nos alimentos, aumentando a vida útil e mantendo a qualidade do produto, além de influenciar as características sensoriais (Guo; Yue; Yuan, 2019; Kumar; Goel, 2019; Starowicz, 2021). Em vinhos e sidras, por exemplo, os fenólicos influenciam o perfil aromático (Guo; Yue; Yuan, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

Os compostos fenólicos têm sido objeto de estudo devido ao seu papel nos processos biotecnológicos, especialmente em fermentações (Leonard *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). Durante o processamento, fermentações e outras transformações, os fenóis podem interagir com proteínas, açúcares e compostos voláteis, impactando o produto e possibilitando novas aplicações (Guiné *et al.*, 2021; Guo; Yue; Yuan, 2019; Perez-Jiménez; Chaya; Pozo-Bayón, 2019). Estudos demonstraram que os polifenóis impactam os compostos voláteis aromáticos, conferindo aroma a bebidas fermentadas e contribuindo para a qualidade sensorial (Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016; Mu *et al.*, 2023; Perez-Jiménez; Chaya; Pozo-Bayón, 2019; Weterings *et al.*, 2020). Diante do exposto, os compostos fenólicos apresentam potencial de substituir diversos aditivos químicos, bem como ser utilizados como ingrediente funcional. Esses compostos estão presentes em subprodutos, como o bagaço de maçã, e a utilização desses resíduos industriais agrega valor e contribui para a sustentabilidade da cadeia produtiva de alimentos (Costa *et al.*, 2022; Skinner *et al.*, 2018).

A pesquisa envolvendo compostos fenólicos extraídos do bagaço de maçã representa uma abordagem relevante para a ciência e para o meio ambiente. Do ponto de vista ambiental, essa prática está associada à demanda por soluções ecológicas e à valorização de resíduos (Costa *et al.*, 2022; Skinner *et al.*, 2018). Enquanto do ponto de vista da ciência, o estudo de compostos fenólicos explora suas interações com microrganismos e sua contribuição para a formação de compostos aromáticos (Guo; Yue; Yuan, 2019; Leonard *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021), principalmente se o estudo for realizado em sidra artificial. A utilização de mosto artificial permite um maior controle das variáveis envolvidas no processo fermentativo, fornecendo um modelo experimental padronizado para a análise da influência dos fenólicos no perfil de compostos voláteis.

Este estudo analisou a influência de compostos fenólicos extraídos do bagaço de maçã sobre os compostos voláteis aromáticos em sidra produzida a partir do mosto artificial. E buscou compreender como esses compostos afetam o perfil aromático final da sidra, contribuindo para

a inovação na produção de bebidas fermentadas e para o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Materiais

Este estudo foi realizado na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), *campus* Uvaranas, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. A análise por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS/MS) foi realizada no departamento de Química da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

O mosto artificial foi elaborado com as seguintes vitaminas: mio-inositol (SM Empreendimentos Farmacêuticos Ltda., São Paulo - SP, Brasil), ácido nicotínico (Florien Fitoativos, Piracicaba – SP, Brasil), ácido pantotênico (SM Empreendimentos Farmacêuticos Ltda., São Paulo - SP, Brasil), biotina (Galena química e farmacêutica Ltda., Campinas – SP, Brasil), tiamina e piridoxina (Gemini Indústria de Insumos Farmacêuticos Ltda., São Paulo – SP, Brasil). Além das vitaminas, foram utilizados glicose e frutose (LabSynth Produtos para Laboratórios Ltda, Diadema – SP, Brasil), e os seguintes sais e compostos: ácido málico, fosfato de potássio diidratado, sulfato de potássio, sulfato de magnésio heptahidratado, cloreto de cálcio diidratado, cloreto de sódio, sulfato de manganês monohidratado, sulfato de zinco heptahidratado, sulfato de cobre, iodeto de potássio, cloreto de cobalto, ácido bórico, molibdato de sódio diidratado, aspartato e glutamato; todos em grau analítico. A levedura utilizada na fermentação foi a *Saccharomyces cerevisiae* r.f. *bayanus* (Fermol Reins Champagnem, Polo Brescia, Itália).

Os padrões utilizados incluíram Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-ácido carboxílico), TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil) -s-triazina), DPPH (2,2-difenil-2-picrilhidrazil) e ABTS (2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-ácido sulfônico), e *Folin-Ciocalteu* da marca Sigma-Aldrich (Steinheim, Alemanha). O etanol 99,5% (Anidrol, São Paulo, Brasil) foi usado como solvente no processo de extração de compostos fenólicos. Os padrões para as curvas de calibração foram: ácido 5-cafeoilquínico (ácido clorogênico) e catequina (Sigma-Aldrich, Steinheim, Alemanha). Para o perfil dos compostos fenólicos individuais, foram utilizados ácido 5-cafeoilquínico (ácido clorogênico), ácido *p*-cumárico, ácido cafeico, floridzina, quercetina-3-D-galactosídeo (hiperosídeo), quercetina-3-β-D-glucosídeo (isoquercetina),

quercetina-3-O-ramnosídeo (quercitrina), quercetina-3-rutinosídeo (rutina) e quercetina-O- α -L arabinofuranosídeo (avicularina), todos da Sigma-Aldrich (Steinheim, Alemanha). As soluções aquosas foram preparadas com água ultrapura (Milli-Q - Millipore, Brasil), e os solventes para análise de cromatografia líquida (metanol 99,8%, acetonitrila e ácido acético) foram obtidos da J.Baker (Estados Unidos). Os demais reagentes foram de grau analítico.

3.2.2 Métodos

3.2.2.1 Formulação do mosto artificial.

O mosto artificial foi preparado seguindo as metodologias descritas por Alberti *et al.* (2011) e Santos *et al.* (2016), com algumas modificações. Sua composição detalhada encontra-se na Tabela 3.1. Os componentes (exceto as vitaminas) foram pesados, transferidos para um béquer e dissolvidos gradualmente em 500 mL de água sob agitação contínua até a completa dissolução. Por fim, as vitaminas foram pesadas e incorporadas e o volume final foi ajustado com água destilada.

Tabela 3.1 - Composição para o preparo de 1 (um) litro de mosto artificial

Composição	Quantidade (g)	Composição	Quantidade (g)
Glicose	89,63	Sulfato de Cobre pentahidratado	0,001
Frutose	38,97	Iodeto de Potássio	0,001
Ácido Málico	2,43	Cloreto de Cobalto (II) hexahidratado	0,0005
Aspartato	0,57	Ácido Bórico	0,001
Glutamato	0,63	Molibdato de amônio	0,001
Sais Minerais		Vitaminas*	
Fosfato de potássio diidratado	0,750	Mio-inositol	0,02
Sulfato de potássio	0,252	Ácido Nicotínico	0,002
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,099	Ácido pantotênico	0,015
Cloreto de Cálcio diidratado	0,155	Tiamina	0,00025
Cloreto de sódio	0,2	Piridoxina	0,00025
Sulfato de manganês monohidratado	0,004	Biotina	0,0001
Sulfato de Zinco heptahidratado	0,004	Água destilada	Até completar 1L

Fonte: Adaptado: Alberti *et al.* Apple wine processing with different nitrogen contents. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 54, n. 3, p. 551–558, 2011 e SANTOS, C. M. E. DOS *et al.* Supplementation of amino acids in apple must for the standardization of volatile compounds in ciders. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 122, n. 2, p. 334–341, 1 jun. 2016.

Nota: *As vitaminas foram adicionadas sem agitação magnética da mistura.

3.2.2.2 Obtenção e secagem do bagaço de maçã

O bagaço de maçã Gala foi obtido por prensagem a frio da fruta, utilizando um Triturador-prensa AGM Máquinas (modelo 70 L/h, RS, Brasil), após a higienização e sanitização. Após a separação do mosto, o bagaço úmido foi submetido à liofilização. Inicialmente, o bagaço foi congelado a -85 °C em um ultrafreezer (Nuair, NU-9668GC, MN, EUA) e, em seguida, submetido à liofilização no equipamento Solab (modelo SL-404, SP, Brasil). O bagaço liofilizado foi então triturado em moinho de rotor tipo ciclone da Fortinox (modelo Star FT 5.1, Brasil) e tamizado na faixa de 20 a 40 mesh, conforme Benvenuti *et al.* (2019). Por fim, foi elaborado o extrato.

3.2.2.3 Extração de compostos fenólicos

A extração de compostos fenólicos do bagaço de maçã seco seguiu o método descrito por Benvenuti *et al.* (2022). O processo foi por maceração em etanol 60% (razão sólido/líquido de 1:20) em banho-maria a 50 °C por 20 minutos. Após, o líquido foi filtrado para a remoção do bagaço, o extrato foi centrifugado (MPW-351, Varsóvia, Polônia) a 4500 x *g* por 20 minutos, para a retirada completa de partículas em suspensão. O sobrenadante coletado foi evaporado a 50 °C em evaporador rotativo (Tecnal, TE-211, Piracicaba, SP, Brasil), removendo o solvente. Em seguida, o extrato foi liofilizado e armazenado a -18 °C até a sua incorporação nos mostos artificiais.

3.2.2.4 Fermentação do mosto artificial

O mosto foi dividido em quatro partes. A primeira parte ficou como controle (SAI). As demais foram enriquecidas com compostos fenólicos e extrato fenólico: SAII recebeu 5 mg/L de floridzina; SAIII, 50 mg/L de ácido clorogênico; e SAIV e SAV receberam extrato fenólico de bagaço de maçã, correspondendo, respectivamente a 25% (81,25 mg CAE/L) e 50% (162,5 mg CAE/L) de aumento na concentração de fenólicos totais. As concentrações de adição foram baseadas no teor de fenólico médio do mosto original: 325 mg CAE/L de fenólicos totais, 5 mg/L de floridzina e 50 mg/L de ácido clorogênico.

Os mostos foram colocados em fermentadores, tipo Erlenmeyer com capacidade de 250 mL, equipados com sistema de batoque para liberação de dióxido de carbono (CO₂) em

frasco contendo solução de metabissulfito de potássio, para a fermentação dos mostos. Cada mosto foi inoculado com 0,2 g/L da cultura *starter* de levedura *Saccharomyces cerevisiae*. A levedura seca ativa foi reidratada em 15 mL do próprio mosto por 20 minutos, conforme recomendações do fabricante. Após a reidratação, a levedura foi incorporada ao restante dos mostos.

A fermentação alcoólica, conduzida em duplicata, ocorreu por 15 dias a 23 ± 1 °C, sendo monitorada pela perda de peso dos fermentadores devido à liberação de CO₂ (Alberti *et al.*, 2011). Após esse período, as amostras foram centrifugadas (10200 x g, 5 °C, 20 minutos) em centrífuga Hitachi Himac CR21GII (Tóquio, Japão). O sobrenadante de cada amostra foi retirado, as sidras foram envasadas e armazenadas a -18 °C até as análises.

3.2.2.5 Cinética da fermentação

A cinética de fermentação foi monitorado durante os 15 dias, por meio de pesagem, que permitiu determinar a perda de massa devido à liberação de CO₂ (g/L) (Alberti *et al.*, 2011). Os parâmetros foram determinados utilizando uma equação polinomial de quarta ordem ($R^2 > 0,985$), que ajustou os dados de perda de peso, possibilitando a comparação do comportamento fermentativo entre os diferentes mostos.

3.2.2.6 Propriedades de cor, caracterização fenólica e antioxidante

3.2.2.6.1 Análise colorimétrica

A cor das sidras foi analisada para determinar a influência das adições através do espaço de cor L*a*b* (L* = luminosidade; a* = vermelho/verde; b* = amarelo/azul). Os valores de *chroma* e o ângulo *hue* foram calculados com base nas equações descritas por McGuire, (1992). As medições foram efetuadas com espectrofotômetro digital CM-5 (Konica Minolta, Japão) e o software SpectraMagic NX CM-S10w (Osaka, Japão), previamente calibrado com padrão branco (água) e padrão preto (zero). As amostras foram analisadas em triplicata através de cubeta de vidro (MC A98, 10 mm) com um ângulo de observação de 10°, seguindo as recomendações do fabricante.

A conversão das coordenadas colorimétricas foi realizada por meio da ferramenta online *Color Designer* (<https://colordesigner.io/convert/labtorgb>), permitindo que as

coordenadas do espaço CIE Lab sejam convertidas para o sistema RGB. As cores correspondentes foram geradas também pela mesma ferramenta e apresentadas para melhor visualização e interpretação dos resultados.

3.2.2.6.2 Determinação dos compostos fenólicos totais - TPC

A determinação do teor de compostos fenólicos totais foi adaptada de Singleton e Rossi (1965), e a leitura foi realizada em espectrofotômetro de microplaca (Epoch, Synergy-Biotek, Winooski, VT, EUA) a 720 nm. Em cada tubo de ensaio, foram adicionados 4,2 mL de água destilada, 50 µL de amostra diluída (1:5) e 250 µL de reagente Folin-Ciocalteu diluído (1:10). Após 3 minutos, foram adicionados 500 µL de carbonato de sódio a 20%. A mistura foi deixada em repouso por uma hora, ao abrigo da luz. As concentrações foram calculadas com base na curva padrão de ácido clorogênico ($y = 0,0008x + 0,0078$; $R^2 = 0,9948$), com concentrações variando de 0 a 200 mg/L. Os resultados foram expressos em miligrama de equivalentes de ácido clorogênico por litro de sidra (mg EAC/L). As análises foram realizadas em triplicata.

3.2.2.6.3 Análise de compostos fenólicos individuais

A identificação e quantificação dos compostos fenólicos individuais foram realizadas por Cromatografia Líquida de Eficiência (CLAE), seguindo o método descrito por Alberti *et al.* (2014). As amostras de sidra (10 mL cada) foram congeladas em ultrafreezer, liofilizadas e reconstituídas em 5 mL de uma solução de ácido acético 2,5% e metanol (3:1, v/v), e filtradas em filtro de seringa de 0,22 µm (Nylon) (Waters, Milford, MA, EUA). A fase móvel utilizada foi composta de 2,5% de ácido acético (solvente A) e acetonitrila (solvente B). O gradiente aplicado foi de 3 - 9% B (0 - 5 minutos), 9 - 16% B (5 - 15 minutos), 16 - 36,4% B (15 - 33 minutos), seguido por uma corrida isocrática a 100% B (5 minutos) e acondicionamento da coluna a 3% B (10 minutos). As condições cromatográficas foram: vazão foi de 1,0 mL/minuto, volume de injeção de 10 µL, temperatura da coluna mantida a 20 °C e a faixa de detecção em 200-400 nm. A identificação e a quantificação foram realizadas por comparação dos tempos de retenção e espectros dos padrões. As leituras da absorbância foram feitas em 280 nm (flavan-3-óis e dihidrochalconas), 320 nm (ácidos hidroxicinâmicos) e 350 nm (flavonóis), utilizando

curvas de calibração padrão para cada composto. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.2.2.6.4 Determinação de flavonoides - TFC

A determinação do TFC das amostras seguiu o método descrito por Zhishen, Mengcheng e Jianming (1999), com modificações. Foram adicionados 250 µL da amostra, em tubos de ensaio, juntamente com 2 mL de água deionizada e 120 µL de nitrito de sódio (0,5 mol/L). A mistura foi agitada e deixada em repouso por cinco minutos em ambiente escuro. Após, adicionou-se 120 µL de cloreto de alumínio a 10%, seguidos de uma nova agitação e repouso por mais cinco minutos em local sem luz. Em seguida, foram adicionados 800 µL de hidróxido de sódio (1 mol/L), com agitação subsequente. Alíquotas de 300 µL foram transferidas para microplaca, e a absorbância lida a 510 nm. As concentrações foram determinadas por meio da curva de padrão de catequina ($y = 0,0018x + 0,0064$; $R^2 = 0,997$), com concentrações entre 20 e 200 mg/L. Os resultados, obtidos em triplicata, foram expressos em miligrama de equivalente de catequina por litro de sidra (mg CAT/L).

3.2.2.6.5 Determinação da capacidade antioxidante

A Capacidade Antioxidante dos extratos foi determinada por três métodos: ABTS, DPPH e FRAP. Os resultados das três análises foram expressos em micromoles de equivalente de trolox por litro de sidra (µmol TE/L).

ABTS: Seguiu o método descrito por Re *et al.* (1999), com adaptações para leitura em microplaca. Uma solução de ABTS (7 mmol/L) foi preparada com persulfato de potássio (2,45 mmol/L) e deixado reagir por 16 horas no escuro. Após esse período, uma alíquota de 4 mL foi transferida para um balão volumétrico e diluída com água destilada até completar o volume de 200 mL. Em seguida, 20 µL da amostra foram colocados na microplaca, adicionados 280 µL da mistura ABTS diluída e deixando reagir por 30 minutos no escuro. A absorbância foi lida a 734 nm. A capacidade antioxidante foi calculada a partir da curva padrão de Trolox ($y = 0,1889x + 1,8324$; $R^2 = 0,986$), com concentrações de 0 a 500 µmol/L.

DPPH: A análise foi realizada seguindo o método de Brand-Williams, Cuvelier e Berset (1995), com modificações. Foram adicionados 10 µL da amostra diluída (1:5) e 190 µL do reagente DPPH diluído 10 vezes (125 µmol/L) em microplacas, deixando-as repousar por 30 minutos no escuro. A leitura da absorbância foi realizada a 517 nm. As concentrações da capacidade antioxidante foram calculadas usando uma curva padrão de Trolox ($y = 0,0699x + 0,2555$; $R^2 = 0,998$), com concentrações de 50 a 500 µmol/L.

FRAP: O método foi adaptado de Benzie e Strain (1996). A solução de FRAP foi preparada com 10 mM de TPTZ, 40 mM de ácido clorídrico e 20 mM de cloreto férrico (10:1:1). Na microplaca, foram adicionados 10 µL de amostra diluída (1:5) e 290 µL da solução FRAP, e a mistura foi deixada reagir em local escuro por 30 minutos. A leitura da absorbância foi realizada a 593 nm. As concentrações da capacidade antioxidante foram determinadas por meio de uma curva padrão de Trolox ($y = 0,001x + 0,0053$; $R^2 = 0,998$), com concentrações de 100 a 1000 µmol/L.

3.2.2.7 Análises dos componentes voláteis de aroma por cromatografia gasosa

As análises cromatográficas foram realizadas no Cromatógrafo a gás Shimadzu modelo GCMS2010 Plus, acoplado a espectrômetro de massas em tandem do tipo triplo quadrupolo (modelo TQ8040), autoamostrador (modelo AC 5000) e hélio analítico (5.0) como gás de arraste. O software *GCMS Solution* foi utilizado para as determinações no modo *Full Scan* no intervalo razão massa/carga. As condições de tempo e temperatura das condições cromatográficas, os parâmetros do espectrômetro de massas e os critérios de identificação dos compostos foram estabelecidos com base na metodologia descrita por Kliks *et al.* (2021), porém com modificações para adequação ao estudo.

Preparação da amostra e extração de compostos voláteis

Inicialmente, 6 mL de cada amostra foram pipetados em vials de headspace com capacidade de 20 mL. Os frascos, devidamente selados para evitar perdas de voláteis, foram incubados a uma controlada de 80 °C por 19 minutos. Após esse período, uma alíquota de 1 µL da fase gasosa foi injetada, no modo de injeção *splitless*, automaticamente no sistema de cromatografia gasosa, utilizando a técnica de *headspace*.

Condições cromatográficas

A separação dos analitos foi efetuada em coluna SLB-5MS - 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm de espessura, com uma vazão de 1,0 mL/minuto. As temperaturas do injetor foi mantida a 220 °C. As condições de pressão e vazão total foram de 50,5 kPa e 24,3 mL/minuto, respectivamente. A programação de temperatura do forno foi otimizado da seguinte forma: a temperatura inicial de 40 °C foi mantida por 2 minutos, seguida de um aumento de 10 °C/minutos até 280 °C. Esta temperatura final foi mantida por 5 minutos, resultando em um tempo total de corrida de 31 minutos.

Condições do espectrômetro de massas

Os espectros de massa foram obtidos com a fonte de ionização e a interface foram mantidas a 250 °C. A faixa de varredura de massa-carga (m/z) foi de 40 e 400, permitindo a detecção e identificação dos compostos.

Análise de dados e identificação de compostos

A análise dos dados cromatográficos foi realizada utilizando o software GCMS LabSolutions 4.20 (Shimadzu). Para a identificação dos compostos, os espectros de massa obtidos foram comparados com as bases de dados da biblioteca NIST (NIST14s.lib e NIST14.lib). A identificação foi considerada apenas para os compostos que apresentaram um índice de similaridade superior a 90%. A semiquantificação foi realizada por meio da porcentagem da área relativa de cada pico em relação à área total dos picos detectados. Os resultados foram expressos em porcentagem da área dos picos, seguindo diversas literaturas (Călugăr *et al.*, 2023; Delfino *et al.*, 2023; Jesus *et al.*, 2021; Mattje *et al.*, 2019).

3.2.2.8 Análise estatística

A análise estatística foi aplicada para avaliar as diferenças significativas entre as amostras estudadas. Os resultados foram apresentados como média $\pm$ desvio padrão. Para identificar diferenças significativas entre as amostras, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) com teste de comparação de médias de Fisher LSD, com um nível de significância de 5%. A análise foi realizada utilizando o software *STATISTICA* versão 8.0 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

Para os componentes de aroma, determinados por cromatografia gasosa, a análise de dados foi semiquantitativa, baseada nas porcentagens das áreas de pico cromatográficos de cada amostra. Para os compostos voláteis e relação de compostos fenólicos e voláteis foi utilizado uma análise de padrões em conjuntos de dados através das técnicas estatísticas de *clustering* e mapa de calor, realizadas utilizando o site Mapa de calor do Expression (<http://www.heatmapper.ca/expression/>).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Parâmetro cinético da fermentação

A composição do mosto artificial foi baseada na média de diferentes cultivares de maçã (Santos *et al.*, 2016). Inicialmente, as amostras continham 128,6 g/L de açúcares totais e, ao final da fermentação, observou-se o consumo quase total (99%) desses açúcares em todas as amostras.

A análise cinética da fermentação alcoólica (Tabela 3.2) revelou maior tempo de adaptação das leveduras nas fermentações SAI, SAII e SAIII em comparação com as fermentações com adição de extrato de compostos fenólicos. As amostras SAIV e SAV registraram a maior velocidade máxima de fermentação, 12,4 g/L, diferindo significativamente das amostras SAI e SIII, que apresentaram os menores valores para a velocidade máxima. Em todas as amostras atingiram a velocidade máxima a partir do terceiro dia de fermentação.

Tabela 3.2 - Parâmetros cinéticos de fermentação alcoólica das sidras artificiais e de maçã

Parâmetros cinéticos	Liberação de CO ₂ (g/L)	V _{max.} (g/L.d)	t _{vmax.} (d)
SAI	56,5 ^c ± 0,7	10,2 ^b ± 0,1	4,0 ^a ± 0,4
SAII	64,4 ^{ab} ± 4,9	11,4 ^{ab} ± 0,9	4,3 ^a ± 0,4
SAIII	61,9 ^{bc} ± 1,6	10,7 ^b ± 0,1	4,3 ^a ± 0,4
SAIV	68,9 ^{ab} ± 4,3	12,4 ^a ± 0,5	3,3 ^b ± 0,4
SAV	70,9 ^a ± 0,4	12,4 ^a ± 0,1	3,0 ^b ± 0,1

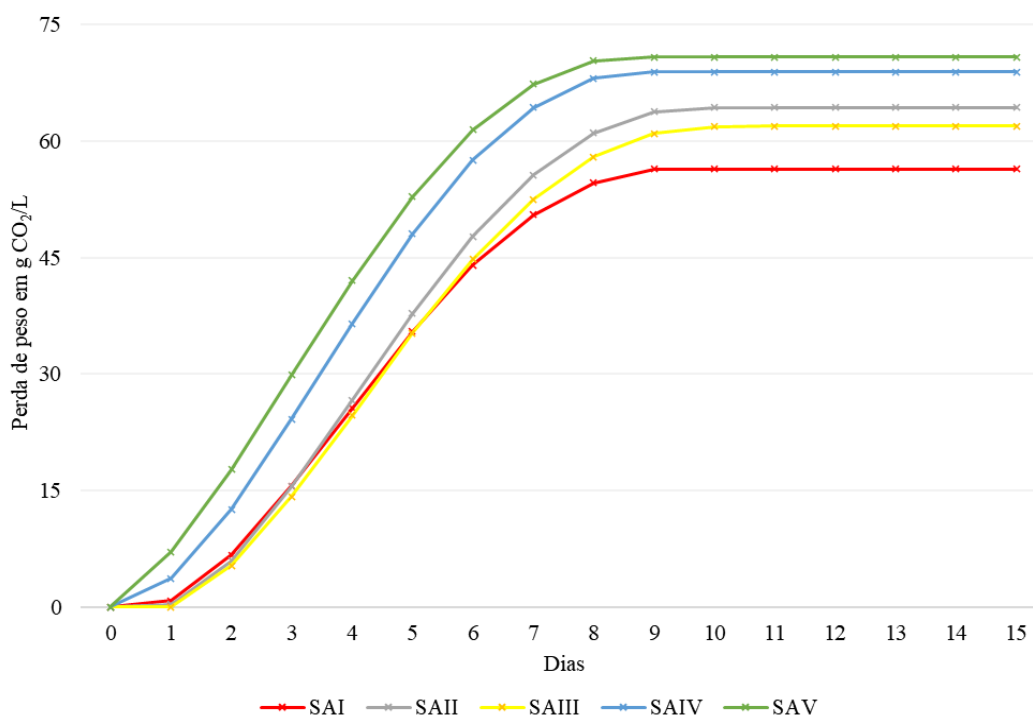
Fonte: A autora

Nota: SAI: sidra artificial controle; SAII: sidra artificial com floridzina; SAIII: sidra artificial com ácido clorogênico; SAIV: sidra artificial com 25% de extrato de compostos fenólicos; SAV: sidra artificial com 50% de extrato de compostos fenólicos; V_{max.} (g/L.d) = velocidade máxima de fermentação; t_{vmax.} = tempo, em dias, que ocorre a velocidade máxima de fermentação. Os resultados expressos em médias de dados obtidos de diferentes fermentações. ^{abc} - letras diferentes dentro da mesma linha indicam diferenças estatísticas (p < 0,05).

A amostra SAI exibiu a menor velocidade máxima de produção de CO_2 (10,2 g/L.d), atingida no quarto dia. No entanto, essa taxa não diferiu estatisticamente das observadas nas mostras SAII (11,4 g/L.d) e SAIII (10,2 g/L.d). As amostras com adição de compostos fenólicos apresentaram maior liberação de CO_2 , sugerindo uma fermentação mais rápida. Comparativamente à amostra controle, a adição de extratos fenólicos do bagaço de maçã otimizou o processo fermentativo em aproximadamente 20%, reduzindo o tempo de fermentação para 8,5 dias, resultado distinto das demais, que levaram de 9,5 a 10 dias. Essa redução de tempo na fermentação pode ser benéfica para a indústria de bebidas, reduzindo custos operacionais (Pinto-Neto *et al.*, 2023).

O Gráfico 3.1 mostra que as sidras artificiais enriquecidas liberaram dióxido de carbono desde o início do processo fermentativo, mantendo níveis superiores de produção de CO_2 em todo o processo. Essa maior eficiência pode ser atribuída à presença de alguns compostos fenólicos, que, segundo Alonso-Salces *et al.* (2004), regulam a ação das leveduras, otimizando o processo e evitando uma fermentação mais lenta.

Gráfico 3.1 - Dinâmica da fermentação alcoólica das sidras artificiais sob diferentes adições de compostos fenólicos e extratos



Fonte: A autora.

Nota: linha vermelha: Sidra artificial controle (SAI); linha cinza: Sidra artificial com floridzina (SAII)/sidra com floridzina (SII); linha amarela: Sidra artificial com ácido clorogênico (SAIII); linha azul: sidra artificial com 25% de extrato (SAIV)/sidra com 25% de extrato (SIV); linha verde: sidra artificial com 50% de extrato (SAV)/sidra com 50% de extrato (SV). Perda de peso de CO_2 por litro de mosto: **(a)** mosto artificial e **(b)** mostos de maçã. Os resultados são referentes às médias das amostras.

3.3.2 Caracterização fenólica e antioxidante das sidras artificiais

A caracterização de compostos fenólicos é essencial para compreender as propriedades antioxidantes e sensoriais de bebidas como sidras e sucos. A composição fenólica varia de acordo com a cultivar da maçã e a parte da planta de onde são extraídos (Kalinowska *et al.*, 2014). Durante a fermentação da sidra, os polifenóis sofrem diversas biotransformações mediadas pela atividade das leveduras, o que afeta as propriedades funcionais e os atributos sensoriais da bebida (Zhang *et al.*, 2021). Por isso, os compostos fenólicos são frequentemente usados como indicadores de qualidade, uma vez que impactam a cor, aroma, adstringência e outras características sensoriais que determinam a qualidade do produto (Way *et al.*, 2020). O aroma é influenciado pelos fenóis através da sua interação com os compostos voláteis aromáticos, alterando a sua solubilidade e volatilidade. No entanto, a influência dos fenóis depende tanto da classe quanto da sua concentração (Cairns *et al.*, 2022; Guo; Yue; Yuan, 2019).

Foram observadas diferenças significativas entre as amostras quanto ao perfil fenólico (Tabela 3.3). A formulação SAV, enriquecida com 50% de extrato de bagaço de maçã, apresentou aumento expressivo no teor de compostos fenólicos (aproximadamente 900%) e de flavonoides (178%) em relação ao controle.

Os resultados da caracterização fenólica revelaram diferenças significativas entre todas as amostras, demonstrando que a adição de extratos fenólicos pode impactar não somente o perfil fenólico, como também influenciar as características sensoriais das bebidas. A amostra

Além disso, a atividade antioxidante foi otimizada pela adição de ácido clorogênico e extratos do bagaço de maçã. A amostra SAV apresentou a maior atividade antioxidante nos três métodos empregados. A alta atividade antioxidante observada no ensaio DPPH pode ser atribuída à presença de procianidinas e glicosídeos de quercetina e ácido clorogênico, compostos fenólicos individuais conhecidos por sua eficiente eliminação de radicais DPPH (Lu; Foo, 2000), corroborando com os fenólicos encontrados na amostra SAV (Tabela 3.3).

A composição fenólica variou significativamente entre as amostras, dependendo dos aditivos utilizados. A amostra SAI não apresentou fenólicos individuais, pois o mosto artificial controle foi elaborado contendo apenas os compostos orgânicos nitrogenados, minerais, vitaminas, carboidratos e lipídeos, sem a inclusão de compostos fenólicos ou outros substratos típicos do suco de maçã. As amostras SAII e SAIII continham apenas os compostos fenólicos adicionados ao mosto para a fermentação. Já as amostras com extratos apresentaram maior

diversidade fenólica. A amostra SAV apresentou três compostos a mais que a SAIV, além de concentrações significativamente maiores dos demais compostos. Essa diferença é atribuída às diferentes concentrações de extrato adicionadas a cada grupo de amostras.

Tabela 3.3 - Concentração de fenóis totais (mg CAE/L), flavonoides totais (mg CAT/L), capacidade antioxidante ($\mu\text{mol TE/L}$) pelos métodos de ABTS, DPPH e FRAP e perfil de fenólicos individuais (mg/L) nas sidras artificiais

Amostras	SAI	SAII	SAIII	SAIV	SAV
Compostos fenólicos					
Fenóis Totais	11,9 ^e $\pm$ 0,2	24,7 ^d $\pm$ 1	41,2 ^c $\pm$ 0,5	56,6 ^b $\pm$ 3	111,8 ^a $\pm$ 4,2
Flavonoides	-	-	0,1 ^c $\pm$ 0,1	64,7 ^b $\pm$ 3	80,6 ^a $\pm$ 1,1
Atividade Antioxidante					
ABTS	-	-	225,2 ^c $\pm$ 4	290,6 ^b $\pm$ 6	428,7 ^a $\pm$ 3,9
DPPH	195,5 ^d $\pm$ 10	131,1 ^e $\pm$ 5	309,6 ^c $\pm$ 7	350,2 ^b $\pm$ 15	547,7 ^a $\pm$ 23
FRAP	-	-	218,7 ^c $\pm$ 8	472,9 ^b $\pm$ 15	799,9 ^a $\pm$ 35
Fenóis Individuais					
Σ Ácidos fenólicos					
Ácido Clorogênico	-	-	51,4 ^a $\pm$ 0,1	4,3 ^c $\pm$ 0,1	8,7 ^b $\pm$ 0,1
Ác. Cumárico	-	-	-	-	1,5 ^a $\pm$ 0,1
Σ Flavonoides					
Σ Flavan-3-óis					
Catequina	-	-	-	13,3 ^b $\pm$ 0,9	15,6 ^a $\pm$ 0,2
Procianidina B1	-	-	-	-	6,8 $\pm$ 0,3
Σ Dihidrochalconas					
Floridzina	-	8,2 ^b $\pm$ 0,1	-	6,0 ^c $\pm$ 0,1	16,2 ^a $\pm$ 0,1
Σ Flavonóis					
Quercetina-3-Rutinósídeo	-	-	-	-	4,0 $\pm$ 0,1
Quercetina-3-D-Galactosídeo	-	-	-	1,1 ^b $\pm$ 0,1	4,0 ^a $\pm$ 0,1
Quercetina-3- β -D-Glucosídeo	-	-	-	2,6 ^b $\pm$ 0,1	6,2 ^a $\pm$ 0,1

Fonte: A autora

Nota: SAI: sidra artificial controle; SAII: sidra artificial com floridzina; SAIII: sidra artificial com ácido clorogênico; SAIV: sidra artificial com 25% de extrato de compostos fenólicos; SAV: sidra artificial com 50% de extrato de compostos fenólicos; ^{abc} - letras diferentes dentro da mesma linha indicam diferenças estatísticas ($p < 0,05$); -: o composto não foi detectado pela metodologia.

As amostras ricas em ácido clorogênico (SAIII, SAIV e SAV) e flavan-3-óis (SAIV e SAV) podem exibir amargor e adstringência, características atribuídas a esses compostos (Mu *et al.*, 2023). O impacto sensorial dessa variação na composição pode ser positivo ou negativo, dependendo do perfil do consumidor e do estilo de sidra desejado. Além disso, altas concentrações de fenólicos podem influenciar significativamente a qualidade final da bebida, afetando cor, aroma e outros atributos sensoriais.

3.3.3 Influência da adição de extratos fenólicos nas propriedades de cor e aroma

A análise colorimétrica revelou o impacto significativo das adições de compostos fenólicos nas propriedades colorimétricas das sidras artificiais, principalmente após a fermentação (Tabela 3.4 e Figura 3.1).

A luminosidade (L^*) foi afetada apenas nas amostras com adição de extrato fenólico, indicando redução dos valores encontrados e apresentando-se mais escuras. Esse fenômeno pode ser atribuído aos compostos adicionados ao mosto. A coordenada a^* revelou que a adição de compostos individuais e do extrato alterou a tonalidade para mais esverdeada.

Tabela 3.4 - Análise colorimétrica da sidra artificial

Amostra	L^*	a^*	b^*	Chroma	Ângulo Hue
SAI	$99,5^a \pm 0,8$	$0,1^a \pm 0,1$	$0,8^c \pm 0,1$	$0,8^c \pm 0,1$	$80,8^e \pm 0,1$
SAII	$100^a \pm 0,1$	$-0,1^b \pm 0,1$	$0,04^e \pm 0,1$	$0,1^e \pm 0,1$	$161,2^a \pm 5,0$
SAIII	$100^a \pm 0,1$	$-0,1^b \pm 0,1$	$0,4^d \pm 0,2$	$0,5^d \pm 0,2$	$101,3^b \pm 1,4$
SAIV	$97,6^c \pm 0,1$	$-0,2^c \pm 0,1$	$5,0^b \pm 0,1$	$5,0^b \pm 0,1$	$92,4^d \pm 0,2$
SAV	$98,6^b \pm 0,1$	$-0,5^d \pm 0,1$	$5,8^a \pm 0,2$	$5,8^a \pm 0,2$	$94,5^c \pm 0,3$

Fonte: A autora

Nota: SAI: sidra artificial controle; SAI: sidra artificial com floridzina; SAIII: sidra artificial com ácido clorogênico; SAIV: sidra artificial com 25% de extrato de compostos fenólicos; SAV: sidra artificial com 50% de extrato de compostos fenólicos; ^{abc} - letras diferentes dentro do mesmo grupo de análise indicam diferenças estatísticas.

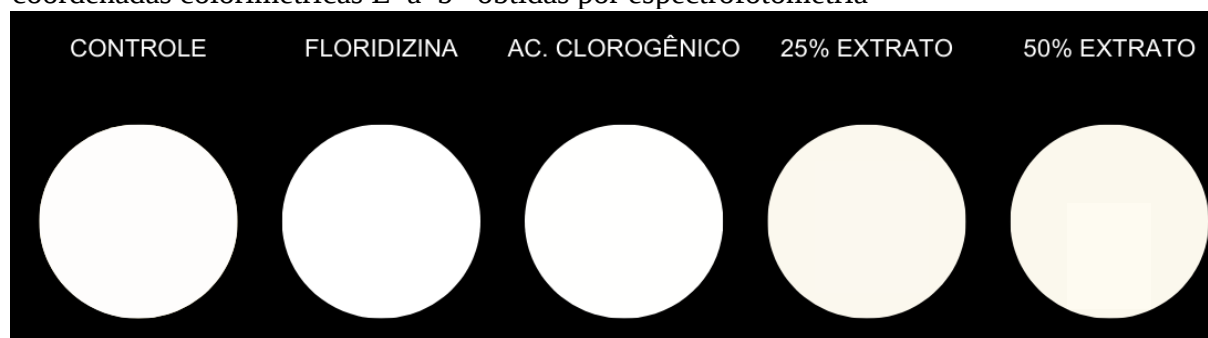
Todas as amostras apresentaram valores positivos para b^* , indicando uma tendência para tons amarelos, mais pronunciada nas sidras com adição de extratos. A coloração amarela pode ser atribuída à presença de flavonoides, principalmente flavonóis do extrato do bagaço de maçã (Benvenuti *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2021), e aos produtos do escurecimento enzimático, que conferem tons amarelo-alaranjados (Février *et al.*, 2017). A oxidação de floridzina e catequina pela enzima polifenol oxidase da maçã pode ter contribuído para a formação das cores amarelas das amostras (Deun *et al.*, 2015; Février *et al.*, 2017). As amostras revelaram diferenças no grau de intensidade cromática. A adição de extratos resultou em bebidas fermentadas com cores mais vibrantes.

A análise do ângulo *hue* revelou variação significativa na tonalidade das amostras, com a amostra SAI apresentando o maior ângulo e aproximando-se de tons mais verde-amarelados, enquanto a amostra SAI apresentou o menor ângulo, 80°, que representa o amarelo. As demais amostras ficaram entre 90 e 100 (amarelo-esverdeadas).

As alterações de cor observadas (Figura 3.1) provavelmente também resultam da interação entre fenóis e leveduras (Alberti *et al.*, 2016). A adição de extratos fenólicos de

bagaço de maçã demonstrou influenciar significativamente a coloração das bebidas, como demonstrado por Benvenuti e colaboradores (2019; 2022). Dessa forma, compreender os fatores que afetam a cor das bebidas é essencial para a indústria de alimentos e bebidas, permitindo a elaboração de produtos visualmente mais atraentes e com maior aceitação do mercado. Pois a percepção visual é o primeiro contato sensorial com o produto (Wang *et al.*, 2024).

Figura 3.1 – Representação colorimétrica das amostras de sidra artificial com base nas coordenadas colorimétricas $L^*a^*b^*$ obtidas por espectrofotometria



Fonte: A autora, com auxílio do site: <https://colordesigner.io/convert/labtorgb>

Os compostos voláteis aromáticos das sidras artificiais foram identificados e estão apresentados na Tabela 3.5, cujas características são correlacionadas na Figura 3.2. Foram detectados vinte e cinco compostos aromáticos nas amostras, sendo dezoito ésteres, cinco álcoois, um ácido carboxílico e uma cetona. A amostra controle (SAI) apresentou uma variedade de compostos aromáticos típicos da atividade da levedura *Saccharomyces Cerevisiae*, especialmente os ésteres acetato de etila, caprilato de etila e caprinato de etila, além do álcool isoamílico, responsáveis pelos aromas frutados em bebidas fermentadas (Wang *et al.*, 2020; Wei; Zhang; Qiu *et al.*, 2020).

Nas demais amostras, além dos metabólitos primários da levedura, a interação entre leveduras e os compostos fenólicos adicionados gerou novos compostos voláteis. Desde o início da fermentação, os polifenóis podem se ligar à membrana plasmática das leveduras, modificando os compostos fenólicos, os voláteis e o próprio processo fermentativo (Ling *et al.*, 2022). Essa interação resulta na formação de diversos compostos aromáticos, como acetato de etila, acetato de n-propila e caprilato de etila (Madrera; Bedriñana; Valles, 2015), contribuindo para os aromas frutados (Niu *et al.*, 2019).

Tabela 3.5 – Composição dos compostos aromáticos detectados por cromatografia gasosa nas sidras artificiais, em porcentagem da área total dos picos

Compostos*	SAI	SAII	SAIII	SAIV	SAV
Ésteres (18)					
Acetato de etila	11,8	12,9	4,6	6,0	9,7
Acetato de isobutila	7,8	4,2	9,1	2,9	9,6
Acetato de propila	5,9	3,5	15,1	2,7	11,0
Caprilato de etila	12,9	15,8	2,9	8,5	3,6
Caprinato de etila	11,9	21,7	1,1	15,2	9,7
Caproato de etila	3,4	3,0	1,8	1,5	0,6
Acetato de linalila	-	-	1,5	-	-
Acetato de isoamila	2,2	1,3	2,3	0,6	0,4
Acetato de butila	9,6	5,5	11,2	5,5	12,3
Isovalerato de etila	5,1	3,2	4,5	2,0	4,9
Butanoato de etila	0,3	0,2	0,7	-	-
3-Hexenoato de etila	0,2	0,2	0,7	0,6	0,6
Caprilato de isoamila	-	0,1	-	-	-
Laurato de etila	0,3	0,7	-	7,0	4,3
Decanoato de isoamila	-	0,1	-	-	-
Miristato de etila	-	-	-	0,4	0,4
Palmitato de etila	-	-	-	0,7	0,9
Linoleato de etila	-	-	-	-	0,3
Álcoois (5)					
Álcool Isobutila	0,3	0,2	0,6	1,4	0,5
Etanol	0,7	0,9	-	2,6	-
Álcool 2-metilbutílico	-	-	1,4	-	10,4
Álcool isoamílico	20,8	8,6	21,2	27,6	5,7
Álcool feniletil	-	-	0,2	-	-
Outros (2)					
Ácido Acético	-	-	-	0,2	-
2-Octanona	0,3	0,4	1,0	1,0	0,8

Fonte: A autora

Nota: SAI: sidra artificial controle; SAI: sidra artificial com floridzina; SAIII: sidra artificial com ácido clorogênico; SAIV: sidra artificial com 25% de extrato de compostos fenólicos; SAV: sidra artificial com 50% de extrato de compostos fenólicos; * Resultados estão expressos em relação a % de área total. Resultados segundo a biblioteca do CG-MS; -: não detectado.

Em todas as cinco amostras analisadas, os ésteres foram os compostos aromáticos predominantes, e a adição de extratos influenciou o surgimento de novos ésteres ou alterou as concentrações dos já presentes, em relação ao controle. Esses resultados sugerem que os compostos fenólicos influenciar o perfil volátil das amostras. Estudos anteriores, como o de Ling *et al.* (2022), também observaram que, em fermentações simuladas com adição de fenólicos, os ésteres foram os compostos mais abundantes, confirmando os achados desta pesquisa. As amostras, SAI e SAI, apresentaram perfis de compostos voláteis bastante semelhantes, com destaque para as concentrações mais elevadas de caprinato de etila, além da formação de caprilato e decanoato de isoamila. A amostra SAIII, por sua vez, diferenciou-se por apresentar maior concentração de acetato de propila e menores quantidades de caprinato e caprilato de etila. Além disso, essa amostra apresentou compostos exclusivos, como o éster

acetato de linalila e o álcool feniletil. Este último é um álcool produzido por leveduras durante o processo de fermentação da sidra a partir de substratos da maçã, conferindo aroma de rosa (Lorenzini *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2023).

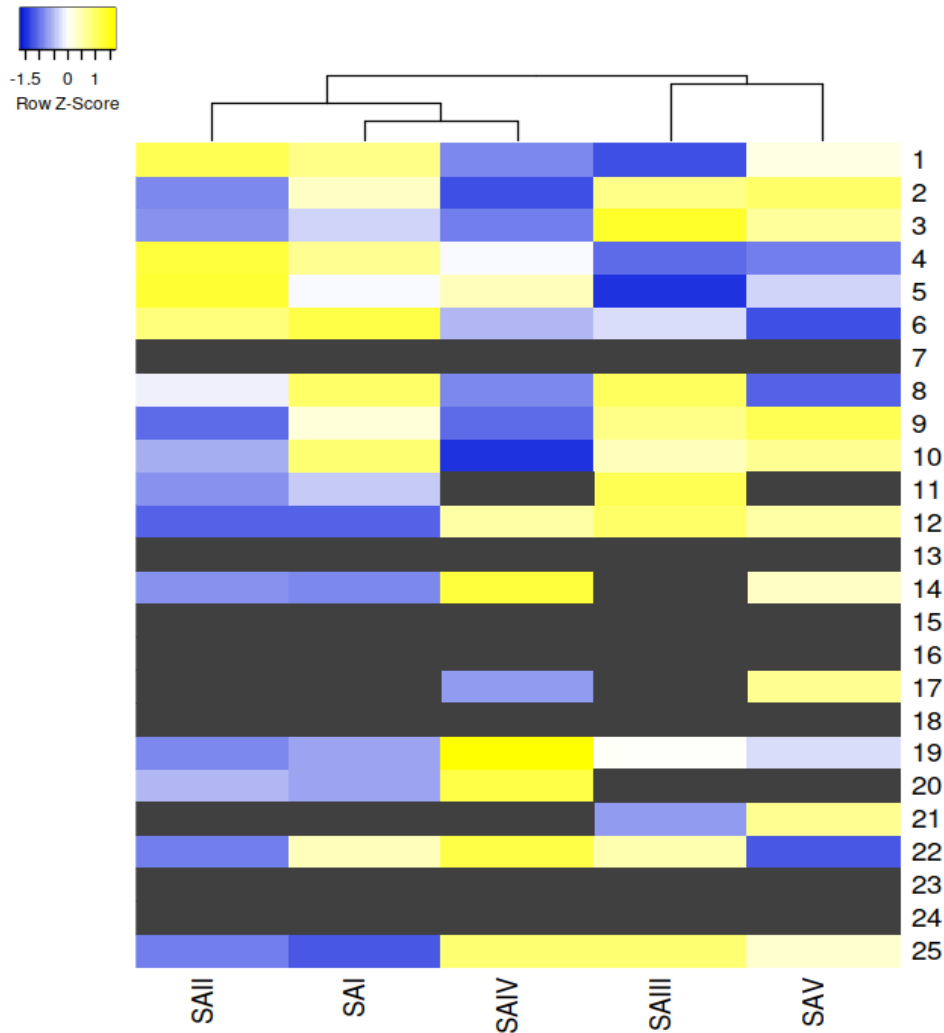
As amostras enriquecidas com extrato apresentaram maior concentração e diversidade de compostos voláteis, evidenciando o efeito da adição de fenólicos na formação de aromas. Entre esses compostos estão laurato, miristato e palmitato de etila, que são responsáveis por aromas frutados, florais e de caramelo (Madrera; Bedriñana; Valles, 2015; Wei; Zhang; Wang *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019).

As amostras com extrato SAIV e SAV diferiram na composição e concentração de alguns de seus compostos voláteis. A SAIV apresentou concentrações maiores de caprinato e caprilato de etila, álcool isoamílico e ácido acético, enquanto na SAV as maiores concentrações foram de acetato de propila, isobutila e butila, além de linoleato de etila. Conforme observado por Guo; Yue e Yuan (2019), o aumento na concentração de compostos fenólicos afeta a volatilidade dos compostos aromáticos. A adição de extrato fenólico também impactou os álcoois e outros voláteis. O álcool isoamílico teve uma redução nas áreas de pico para as amostras SAI e SAV, enquanto em outras amostras houve a formação de novos álcoois, como 2-metilbutílico (SAIII e SAV) e álcool feniletílico (SAIII).

A Figura 3.2 apresenta um mapa de calor e a análise de agrupamento (*clusters*), ilustrando a concentração dos compostos em cada tipo de sidra artificial e a similaridade entre elas. As amostras SAI e SAIV mostraram maior similaridade, formando um subgrupo junto com a SAI. Enquanto as amostras SAIII e, especialmente, SAV apresentaram maior dissimilaridade em relação às demais, destacando-se do subgrupo da amostra controle.

As diferenças na composição de compostos voláteis entre as amostras resultam da interação de *Saccharomyces cerevisiae* com os compostos fenólicos adicionados, bem como da quantidade desses compostos e de suas interações com os compostos voláteis (Guo; Yue; Yuan, 2019; Lorrain *et al.*, 2013; Pittari; Moio; Piombino, 2021; Robinson *et al.*, 2009).

Figura 3.2 - Análise de *clustering* e mapa de calor da distribuição de valores entre as diferentes sidras artificiais



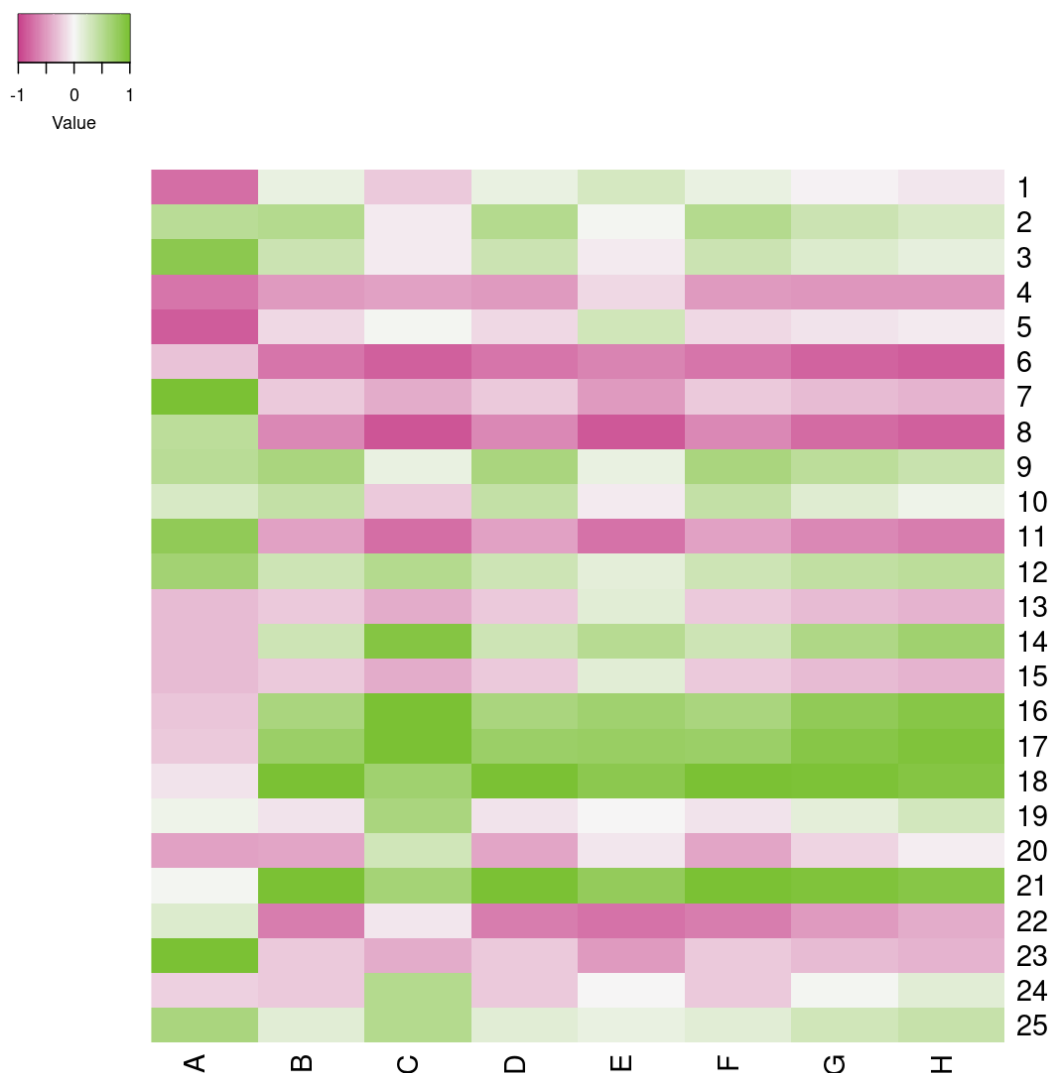
Fonte: A autora

Nota: SAI: sidra controle; SAI: sidra com floridzina; SAIII: sidra com ácido clorogênico; SAIV: sidra com 25% de extrato de compostos fenólicos; SAV: sidra com 50% de extrato de compostos fenólicos. 1: acetato de etila; 2: acetato de isobutila; 3: acetato de propila; 4: caprilato de etila; 5: caprinato de etila; 6: caproato de etila; 7: acetato de linalila; 8: acetato de isoamila; 9: acetato de butila; 10: isovalerato de etila; 11: butanoato de etila; 12: 3-hexenoato de etila; 13: caprilato de isoamila; 14: laurato de etila; 15: decanoato de isoamila; 16: miristato de etila; 17: palmitato de etila; 18: linolato de etila; 19: álcool isobutila; 20: etanol; 21: álcool 2-metilbutílico; 22: álcool isoamílico; 23: álcool feniletíl; 24: ácido acético; e 25: 2-octanona. *As cores mais amarelas indicam maior concentração ou relação entre os compostos, enquanto os tons azuis representam menor associação. Cor preta, indica que não estava presente ou não teve associação.

Os compostos fenólicos (Tabela 3.3) e de aroma (Tabela 3.5) identificados no estudo foram submetidos a um mapa de calor (Figura 3.3) para identificar correspondências visuais entre eles e observar possíveis tendências. Os resultados indicaram que o composto fenólico ácido clorogênico (A), presente nas amostras SAIII, SAIV e SAV, apresentou maior concentração de alguns compostos voláteis: acetato de propila (3), acetato de linalila (7), butanoato de etila (11), álcool isoamílico (22) e 2-octanona (25). Além disso, as bebidas SAI,

SAIV e SV, com maiores concentrações de floridzina (E) e/ou quercetina-3- β -D-glucosídeo (H) mostraram-se associadas a compostos como laurato de etila (14), miristato de etila (16), palmitato de etila (17), linolato de etila (18) e álcool 2-metilbutílico (21).

Figura 3.3 - Análise de mapa de calor entre compostos fenólicos e compostos voláteis aromáticos,



Fonte: A autora

Nota: A: Ácido Clorogênico; B: Ácido Cumárico; C: Catequina; D: Procianidina B1; E: Floridzina; F: Quercetina-3-Rutinósídeo; G: Quercetina-3-D-Galactosídeo; H: Quercetina-3- β -D-Glucosídeo; 1: Acetato de etila; 2: Acetato de isobutila; 3: Acetato de propila; 4: Caprilato de etila; 5: Caprinato de etila; 6: Caproato de etila; 7: Acetato de linalol; 8: Acetato de isoamila; 9: Acetato de butila; 10: Isovalerato de etila; 11: Butanoato de etila; 12: 3-Hexenoato de etila; 13: Caprilato de isoamila; 14: Laurato de etila; 15: Decanoato de isoamila; 16: Miristato de etila; 17: Palmitato de etila; 18: Linolato de etila; 19: Álcool isobutila; 20: Etanol; 21: Álcool 2-metilbutílico; 22: Álcool isoamílico; 23: Álcool feniletil; 24: Ácido acético; e 25: 2-Octanona. *Cores verde indicam maior relação entre os compostos, enquanto rosa representa menor associação. Cor branca, sem relação entre os fenólicos e os voláteis.

Estudos anteriores indicam que compostos fenólicos individuais podem influenciar a volatilidade e a solubilidade de compostos voláteis específicos. Pittari; Moio e Piombino (2021)

demonstraram que a catequina pode reduzir a volatilidade de compostos como o hexanoato de etila, o acetato de isoamila, o benzaldeído, o limoneno e o octanoato de etila, enquanto o ácido p-cumárico e o ácido gálico tendem a diminuir a volatilização de terpenos. Além disso, eles também observaram que a catequina, ácido cafeico e quercetina podem impedir a percepção olfativa do decanoato de etila.

Além disso, o estudo realizado por Wu; Zhong; Zhang (2023) investigou os efeitos da adição de ácido cafeico e ácido clorogênico em fermentados de lichia, observando um aumento na concentração de alguns compostos voláteis essenciais ao aroma, como caprilato de etila, acetato de isoamila e álcool isobutílico. Os resultados deste estudo reforçam a influência do ácido clorogênico na modulação de compostos voláteis, como observado nas amostras analisadas. Do mesmo modo, Zhang *et al.* (2022) também estudaram a ação do ácido clorogênico (A) sobre compostos aromáticos e observaram que ele exerce efeito negativo sobre o acetato de etila (1), inibindo sua volatilização.

Entre os 25 compostos voláteis identificados neste estudo, oito não apresentaram padrões visuais coincidentes com os compostos fenólicos identificados. Isso sugere que esses compostos podem estar mais relacionados ao processo de fermentação realizado por *Saccharomyces cerevisiae* e aos aminoácidos presentes no mosto artificial, uma influência não diretamente associada aos compostos fenólicos.

A influência dos compostos fenólicos sobre os voláteis foi demonstrada, impactando diretamente a formação de aromas desejáveis e indesejáveis (avinagrado, mofo, fermento e solvente). Isso é consistente com os achados de Guo; Yue; Yuan (2019), que destacaram os efeitos variados dos polifenóis sobre os compostos de aroma.

3.4 CONCLUSÃO

Este capítulo avaliou o mosto artificial como ferramenta alternativa para analisar a fermentação alcoólica e o desenvolvimento de compostos aromáticos em sidras com diferentes adições de fenóis. Os resultados demonstraram a eficiência do mosto artificial para estudar a influência desses compostos no processo fermentativo e na formação de compostos voláteis que são responsáveis pelo aroma da sidra. A utilização do mosto artificial reduz as variáveis interferentes, permitindo um controle mais preciso das condições estudadas.

As análises revelaram que os extratos fenólicos interferem na fermentação alcoólica, acelerando o processo e influenciam a formação de compostos voláteis, aprimorando o perfil

aromático da sidra. Observou-se variações nos compostos aromáticos entre as amostras, correlacionadas com a presença de fenóis específicos. Portanto, a adição de extratos de compostos fenólicos do bagaço de maçã é uma alternativa viável para otimizar a fermentação alcoólica e a formação e concentração de compostos voláteis responsáveis pelo aroma.

CAPÍTULO 4 - EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE EXTRATO FENÓLICO DO BAGAÇO DE MAÇÃ NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E NO PERFIL AROMÁTICO DO MOSTO E SIDRA

RESUMO

O aroma é uma das principais características da sidra, influenciando diretamente sua qualidade e aceitabilidade pelos consumidores. Este estudo investigou o efeito da adição de floridzina (II), ácido clorogênico (III) e extrato fenólico (25% - IV e 50% - V) ao mosto de maçã, analisando sua influência na fermentação alcoólica, no perfil fenólico e no desenvolvimento dos compostos aromáticos, tanto no mosto (M) quanto na sidra (S). As sidras enriquecidas com extrato fenólico (SIV e SV) apresentaram resultados promissores em relação ao controle. A fermentação alcoólica foi 18% mais eficiente nessas sidras, indicando um potencial para a redução de custos de produção. Observou-se uma diminuição nos teores de fenóis totais (32,1% a 49,4%) e flavonoides (17% a 44,4%), alterando o perfil fenólico. Os ácidos hidroxicinâmicos predominaram entre os fenóis individuais, com concentrações entre 41,0 (MII) a 122,0 mg/L (SIII). Apesar da redução nos teores de fenóis totais, a atividade antioxidante foi mantida nas sidras enriquecidas. Além disso, novos fenólicos foram gerados após a fermentação. A análise calorimétrica revelou diferenças de cor entre as amostras de sidra e mosto de maçã, especialmente nas amostras com adições. Os mostos apresentaram maior luminosidade (L), entre 70 e 85, enquanto as sidras exibiram valores variaram entre 40 e 65, indicando escurecimento após a fermentação. A coordenada a^* variou de -3 a 12, com as sidras apresentando tons mais avermelhados. O *chroma* (10 a 35), refletindo maior intensidade de cor nas sidras. A análise dos compostos voláteis identificou 44 compostos aromáticos entre as amostras. A adição de extratos ao mosto modificou o perfil aromático das sidras, influenciando a concentração de ésteres, álcoois, ácidos, cetonas e terpenos. Os aldeídos predominaram nos mostos, porém suas concentrações foram reduzidas após a fermentação. Por outro lado, os ésteres foram mais abundantes nas sidras, especialmente nas amostras SIII e SV, representando mais de 70% dos compostos identificados. A análise sensorial revelou perfis aromáticos distintos e intensidades variadas. A sidra SIV destacou-se por seu equilíbrio e intensidade aromática. A SIII apresentou aroma intenso, lembrando suco de maçã. A SV exibiu a maior diversidade aromática, embora com intensidade moderada. A SI apresentou aroma suave, enquanto a sidra SII teve menor aceitação devido a um aroma acético percebido. A incorporação de extrato fenólico impactou significativamente a fermentação, as características bioativas e o perfil aromático dos mostos e sidras. O uso de extratos de bagaço de maçã surge como uma estratégia promissora para aprimorar a qualidade de bebidas de maçã, conferindo benefícios à saúde e um aroma mais complexo. Esses resultados também fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de novos produtos na indústria de bebidas, além de promoverem sustentabilidade.

Palavras-chave: Compostos bioativos. Compostos voláteis. Extratos fenólicos. Fermentação. Perfil aromático.

4.1 INTRODUÇÃO

A maçã (*Malus domestica*, Borkh) está entre as frutas mais consumidas, principalmente *in natura*. Entretanto, também pode ser utilizada no processamento de sucos, sidras e outros derivados (Fioravanço; Silveira, 2013; Soomro *et al.*, 2022). Embora qualquer variedade de maçã possa ser empregada na produção de sidra, existe uma diferença marcante entre maçãs de mesa (consumo *in natura*) e as destinadas à produção de sidras (industriais) (Littleson *et al.*, 2023). As maçãs para sidra geralmente são mais ácidas e com elevado teor de compostos fenólicos, enquanto as maçãs de mesa possuem maiores teores de açúcares e nitrogênio, com menores concentrações de fenólicos (Littleson *et al.*, 2023; Soomro *et al.*, 2022). Com isso, a variedade da maçã exerce um papel importante na qualidade final da sidra, pois altos teores de ácido e de fenóis afetam a cinética da fermentação alcoólica e a composição aromática da bebida (Girschik *et al.*, 2017; Littleson *et al.*, 2023).

O crescente consumo de sidra impulsionou o uso de maçãs de mesa que não atendem aos padrões de qualidade para o consumo *in natura*, somando com as vantagens do cultivo dessas maçãs, tornou-se uma alternativa viável para a produção da bebida (Dhillon; Kaur; Brar, 2013; Kruczek *et al.*, 2023; Soomro *et al.*, 2022). Contudo, as características dessas frutas exigem ajustes nas condições físico-químicas da bebida para garantir sua qualidade (Acquavia *et al.*, 2021; Lin; Warmund; Kwasniewski, 2024). A cultivar Gala, por exemplo, é uma maçã de mesa que se adequa à produção de sidra (Soomro *et al.*, 2022).

O processamento de maçãs gera um subproduto, o bagaço, que representa cerca de 25 a 40% do peso total da fruta e é frequentemente descartado (Fernandes *et al.*, 2019; Barreira; Arraibi; Ferreira, 2019; Sobczak *et al.*, 2022). Entretanto, o bagaço é rico em compostos bioativos e nutrientes, com potenciais benefícios à saúde (Ahmed *et al.*, 2022; Barreira; Arraibi; Ferreira, 2019; Skinner *et al.*, 2018; Sobczak *et al.*, 2022). Seu aproveitamento no desenvolvimento de novos produtos diversifica o mercado alimentício, melhora a composição nutricional e a qualidade aromática, aumenta a vida útil do produto e reduz o desperdício e a contaminação ambiental (Sobczak *et al.*, 2022; Ahmed *et al.*, 2022; Fărcaș *et al.*, 2022; Lyu *et al.*, 2020; Skinner *et al.*, 2018).

Entre os compostos bioativos do bagaço, os polifenóis se destacam pela alta concentração. Sua extração permite a incorporação em bebidas, influenciando as características sensoriais como cor, amargor, aroma, adstringência e sabor (Benvenuti *et al.*, 2019; Sobczak

et al., 2022; Verdu *et al.*, 2014). Além disso, os polifenóis contribuem para a estabilidade microbiológica e o controle da fermentação (Mu *et al.*, 2023).

O aroma é um indicador fundamental para a aceitação de bebidas fermentadas pelos consumidores (Espino-Díaz; Sepúlveda; Gonzáles-Aguilar, 2016; Mu *et al.*, 2023; Weterings *et al.*, 2020), sendo um importante indicador de qualidade. Sua composição é definida por compostos voláteis, cuja formação é influenciada por diversos outros compostos, como aminoácidos, açúcares, ácidos e, especialmente, polifenóis (Starowicz, 2021; Weterings *et al.*, 2020). Os polifenóis afetam a volatilidade e a solubilidade dos compostos aromáticos, impactando diretamente a qualidade sensorial das sidras (Guo; Yue; Yuan, 2019; Mu *et al.*, 2023). Durante a fermentação, sua interação contribui para a formação e liberação de terpenos livres, conferindo aromas frutados e florais às bebidas (Wang *et al.*, 2021). No entanto, a influência dos polifenóis no perfil volátil varia de acordo com sua estrutura química e a força da ligação voláteis-polifenóis (Guiné *et al.*, 2021; Guo; Yue; Yuan, 2019).

Embora existam estudos sobre os compostos fenólicos do bagaço de maçã, sidras produzidas com maçãs de mesa e seus compostos voláteis, ainda há lacunas sobre o efeito da adição de extratos fenólicos de bagaço de maçã na produção e qualidade aromática da sidra. Dessa forma, este capítulo teve como objetivo desenvolver, analisar e comparar mostos e sidras enriquecidos com extratos fenólicos, avaliando seu impacto na fermentação e no desenvolvimento de compostos voláteis aromáticos. A proposta visou introduzir uma inovação no mercado, proporcionando bebidas de alta qualidade aromática e com potencial funcional.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Materiais

As maçãs utilizadas foram da cultivar Gala, adquiridas em 2024 no comércio de Curitiba, Paraná, Brasil. O estudo foi realizado na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), *Campus Uvaranas*, em Ponta Grossa, Paraná, Brasil. A análise por cromatografia gasosa (GC-MS/MS) foi conduzida no Laboratório Multiusuário do departamento de Química da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Os reagentes empregados incluíram Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-ácido carboxílico), TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil) -s-triazina), DPPH (2,2-difenil-2-picrilhidrazil), ABTS (2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-ácido sulfônico), e o *Folin-Ciocalteu* da marca

Sigma-Aldrich (Steinheim, Alemanha). O etanol 99,5% (Anidrol, São Paulo, Brasil) foi usado como solvente na extração de compostos fenólicos. As curvas padrão foram preparadas utilizando ácido 5-cafeoilquínico (ácido clorogênico) e catequina, ambos da marca Sigma-Aldrich (Steinheim, Alemanha). Para o perfil dos compostos fenólicos individuais, foram utilizados ácido 5-cafeoilquínico (ácido clorogênico), ácido *p*-cumárico, ácido cafeico, floridzina, quercetina-3-D-galactosídeo (hiperosídeo), quercetina-3- β -D-glucosídeo (isoquercetina), quercetina-3-O-ramnosídeo (quercitrina), quercetina-3-rutinosídeo (rutina) e quercetina-O- α -L arabinofuranosídeo (avicularina), todos da Sigma-Aldrich (Steinheim, Alemanha). As soluções aquosas foram preparadas com água ultrapura (Milli-Q - Millipore, Brasil), e os solventes para análise de cromatografia líquida foram metanol 99,8%, acetonitrila e ácido acético (JTBaker, Estados Unidos). Os demais reagentes eram de grau analítico.

4.2.2 Métodos

4.2.2.1 Obtenção do mosto e bagaço de maçã

As maçãs foram lavadas e sanitizadas em solução de hipoclorito de sódio a 200 mg/L por 10 minutos (Gomes *et al.*, 2014), enxaguadas em água corrente, trituradas e prensadas em um triturador-prensa a frio de 70 L/h (AGM Máquinas, RS, Brasil), resultando na separação do mosto e do bagaço da maçã. O rendimento do mosto foi de aproximadamente 72% do peso total da fruta processada.

Após a extração, o mosto foi despectinizado com a enzima Pectinex-Batch 1201371L (Novozymes Latin América LTDA, Araucária, Brasil) a 3,0 mL/hL, a 45 °C, até a completa sedimentação. Em seguida, foi trasfegado, engarrafado e armazenado a -18 °C.

4.2.2.2 Secagem do bagaço de maçã

O bagaço foi acondicionado em recipientes plásticos e submetido a congelamento rápido a -80 °C em ultrafreezer (Nuaire, NU-9668GC, USA). Após o congelamento, foi liofilizado no Liofilizador Solab (SL-404, SP, Brasil) a -40 °C e sob vácuo por aproximadamente 42 horas. Posteriormente, foi triturado em moinho de rotor tipo ciclone (Fortinox, Star FT 5.1, Brasil) e tamisado na faixa de 20 a 40 mesh, conforme Benvenuti *et al.* (2019).

4.2.2.3 Extração de compostos fenólicos

Os compostos fenólicos foram extraídos do material seco por maceração, conforme descrito por Benvenuti *et al.* (2022). Utilizou-se uma razão sólido-líquido de 1:20 com etanol a 60% em banho-maria a 50 °C por 20 minutos. Em seguida, a solução foi filtrada para a remoção do bagaço. O extrato foi centrifugado (MPW-351, Varsóvia, Polônia) a 4500 x *g* por 20 minutos para a retirada das partículas em suspensão. O sobrenadante foi coletado e concentrado em evaporador rotativo (Tecnal, TE-211, Piracicaba, SP, Brasil) a 50 °C, removendo todo o solvente. O extrato obtido foi liofilizado e armazenado à -18 °C até sua adição às bebidas.

4.2.2.4 Processamento do mosto de maçã e fermentação da sidra

O processo de fermentação foi realizado em escala laboratorial. A Tabela 4.1 apresenta as informações sobre os diferentes tratamentos aplicados aos mostos e sidras, com as concentrações de floridzina e ácido clorogênico, além dos extratos adicionados. Os mostos e as sidras seguem o mesmo padrão de nomenclatura, facilitando a comparação entre as diferentes adições.

Tabela 4.1 - Diferentes tratamentos aplicados aos mostos e sidras

Tipo de Mosto/Sidra	Denominação	Enriquecimento	Concentração
Mosto de Maçã	MI	Controle	-
	MII	Floridzina	5 mg/L
	MIII	Ácido Clorogênico	50 mg/L
	MIV	Extrato de compostos fenólicos	25%
	MV	Extrato de compostos fenólicos	50%
Sidra de maçã	SI	Controle	-
	SII	Floridzina	5 mg/L
	SIII	Ácido Clorogênico	50 mg/L
	SIV	Extrato de compostos fenólicos	25%
	SV	Extrato de compostos fenólicos	50%

Fonte: A autora

As concentrações de compostos fenólicos individuais e dos extratos adicionados foram baseadas no teor presente no mosto de maçã. O mosto de maçã continha, em média, 325 mg CAE/L de compostos fenólicos totais, 5 mg/L de floridzina e 50 mg/L de ácido clorogênico. No mosto MIV, adicionou-se 25% a mais de compostos fenólicos totais (aproximadamente

81,25 mg CAE/L), enquanto no mosto MV, a adição foi de 50% (cerca de 162,5 mg CAE/L). Após o processamento, parte dos mostos foi envasada e armazenada a -18°C até a utilização.

A outra parte foi distribuída em 20 fermentadores (análise realizada em duplicata) do tipo Erlenmeyer com capacidade de 250 mL. Cada fermentador foi inoculado com a levedura *Saccharomyces cerevisiae* (cultura *starter*) a uma concentração de 0,2 g/L. A levedura seca ativa foi reidratada em 15 mL de cada mosto por 20 minutos, seguindo as instruções do fabricante. Após a reidratação, a levedura foi adicionada ao restante do mosto em cada fermentador. Os fermentadores, equipados com sistema de batoque para a liberação de dióxido de carbono em uma solução de metabissulfito de potássio, foram mantidos a 23 ± 1 °C durante 15 dias para a fermentação alcoólica.

O processo foi monitorado através da perda de peso dos fermentadores, em função da liberação de dióxido de carbono. Após 15 dias de fermentação, as amostras foram centrifugadas a $10200 \times g$ a 5 °C, por 20 minutos, utilizando a centrífuga Hitachi Himac CR21GII (Tóquio, Japão). Os sobrenadantes de cada amostra foram separados, e as sidras, então, envasadas e armazenadas a -18 °C até as análises (Alberti *et al.*, 2011).

4.2.2.5 Cinética da fermentação

Durante os 15 dias de fermentação, os mostos foram monitorados para acompanhar a perda de massa decorrente da liberação de gás carbônico durante a fermentação. A cinética da fermentação foi calculada a partir dessas leituras, obtendo-se a velocidade do processo (Alberti *et al.*, 2011). Os parâmetros foram determinados utilizando uma equação polinomial de quarta ordem, com R^2 superior a 0,985, o que permitiu a correção dos pontos de perda de peso.

4.2.2.6 Determinação das concentrações de açúcares

A quantificação de açúcares ocorreu por cromatografia Líquida de alta eficiência (CLAE), de acordo com a metodologia descrita por Santos *et al.* (2018). Os mostos foram diluídos na proporção de 1:10, e as amostras passaram por filtragem com filtros de seringa de nylon de 0,22 µm antes das análises. Utilizou-se um sistema de CLAE com bomba quaternária, degaseificador e autoinjeter, acoplado a um detector de índice de refração Waters RI 2414 (Milford MA, EUA). O sistema operou em modo de eluição isocrático com solução aquosa de ácido sulfúrico 0,005 M, em fluxo de 0,5 mL/minutos. A coluna Aminex HPX-87H (300 x 7,8

mm) foi mantida a 30 °C. A identificação ocorreu por meio da comparação dos tempos de retenção dos padrões de referência, e a quantificação foi de acordo com as curvas de calibração das referências, descritas pela concentração de g/100mL (sacarose: $y = 8E06x + 14334$, $R^2 = 0,999$; glucose: $y = 1E07x - 57867$, $R^2 = 0,999$; frutose: $y = 9E06x + -77754$, $R^2 = 0,999$).

4.2.2.7 Propriedades de cor e caracterização fenólica e antioxidante

4.2.2.7.1 Análise colorimétrica

A cor foi avaliada através da leitura do espaço de cor $L^*a^*b^*$, realizada com um espectrofotômetro digital CM - 5 (Konica Minolta, Japão) e o software SpectraMagic NX CM-S10w (Osaka, Japão). Tanto a calibração quanto as leituras das cores das amostras foram realizadas conforme as orientações do fabricante. Os valores de *chroma* e do ângulo *hue*, foram calculadas de acordo com as equações de McGuire (1992) apresentadas abaixo:

$$\text{- Chroma: } C = (a^* \cdot .2 + b^* \cdot .2)^{1/2} \quad (4.1)$$

$$\text{- Ângulo Hue: } H = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) + 180 \text{ quando } a < 0 \quad (4.2)$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \text{ quando } a > 0 \quad (4.3)$$

As coordenadas de cor CIE lab. Foram convertidas para o sistema RGB usando a ferramenta online *Color Designer* (<https://colordesigner.io/convert/labtorgb>). Isso gerou uma representação visual das cores, facilitando a interpretação dos resultados.

4.2.2.7.2 Determinação dos compostos fenólicos totais - TPC

A metodologia seguiu conforme descrita por Singleton e Rossi (1965), com algumas adaptações. Em um tubo de ensaio, foram adicionados 4,2 mL de água destilada, 50 µL de amostra diluída (1:5) e 250 µL de reagente *Folin-Ciocalteu* diluído (1:10). Após aguardar 3 minutos, foram adicionados 500 µL de carbonato de sódio a 20%, deixando a mistura em repouso por uma hora no escuro. A absorbância foi lida a 720 nm usando um espectrofotômetro de microplaca (Epoch, Synergy-Biotek, Winooski, VT, EUA). As concentrações foram

calculadas com base na curva padrão do ácido clorogênico, definida pela equação $y \text{ (mg/L)} = 0,0008x + 0,0078$; $R^2 = 0,9948$. Os resultados foram expressos como miligramas de ácido clorogênico por litro de sidra (mg EAC/L) e a análise foi realizada em triplicata.

4.2.2.7.3 Análise de compostos fenólicos individuais

Foi realizada cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), de acordo com Alberti *et al.* (2014), com modificações. As amostras de sidras (10 mL) foram congeladas em ultrafreezer e, em seguida, liofilizadas. Elas foram reconstituídas em 5 mL de solução de ácido acético a 2,5% e metanol (3:1, v/v) e filtradas em filtro de seringa 0,22 μm (nylon) (Waters, Milford, MA, EUA). A fase móvel utilizada foi composta por 2,5% de ácido acético (solvente A) e acetonitrila (solvente B). O gradiente aplicado foi de 3 a 9% de B (0 a 5 minutos), 9 a 16% de B (5 a 15 minutos), 16 a 36,4% de B (15 a 33 minutos), seguido por uma corrida isocrática a 100% de B por 5 minutos, com condicionamento da coluna a 3% de B por 10 minutos. A vazão foi de 1,0 mL/minutos, o volume de injeção de 10 μL , e a temperatura da coluna foi mantida a 20 °C. A identificação e a quantificação dos compostos foram realizadas comparando os tempos de retenção e os espectros dos padrões. As leituras de absorbância foram feitas a 280 nm (flavan-3-óis e dihidrochalconas), 320 nm (ácidos hidroxicinâmicos) e 350 nm (flavonóis), com os cálculos baseados nas curvas padrão dos respectivos compostos. As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.2.7.4 Determinação de flavonoides - TFC

Foi realizada conforme o método descrito por Zhishen; Mengcheng e Jianming (1999), com adaptações. Foram adicionados 250 μL da amostra, em tubos de ensaio, juntamente com 2 mL de água deionizada e 120 μL de nitrito de sódio (0,5 mol/L). A mistura foi agitada e deixada em repouso por cinco minutos no escuro. Após esse tempo, foram incorporados 120 μL de cloreto de alumínio a 10%, com nova agitação e repouso por cinco minutos no escuro. Em seguida, foram adicionados 800 μL de hidróxido de sódio (1 mol/L), e a mistura foi agitada. Aliquotas de 300 μL foram transferidas para uma microplaca, onde as leituras de absorbância foram realizadas a 510 nm. As concentrações foram calculadas a partir da curva padrão de catequina ($y \text{ (mg/L)} = 0,0018x + 0,0064$; $R^2 = 0,997$), considerando as concentrações no

intervalo de 20 a 200 mg/L. Os resultados foram expressos em miligramas de catequina equivalente por litro de sidra (mg CAT/L), sendo a análise conduzida em triplicata.

4.2.2.7.5 Determinação da capacidade antioxidante

A capacidade antioxidante da sidra foi determinada por meio de três métodos: ABTS, DPPH e FRAP, realizados em triplicata, com os resultados expressos em micromoles equivalente de Trolox por litro de sidra ($\mu\text{mol TE/L}$).

No método ABTS, seguindo a metodologia descrita por Re *et al.* (1999), com modificações, preparou-se uma solução de ABTS (7 mmol/L) e persulfato de potássio (2,45 mmol/L), que reagiu por 16 horas em ambiente escuro. Após esse período, 4 mL da solução foram diluídos a 200 mL com água destilada. Em seguida, 20 μL da amostra foram adicionadas à microplaca, juntamente com 280 μL da solução de ABTS diluída, e deixada reagir por 30 minutos no escuro. A absorbância foi medida a 734 nm e as concentrações calculadas por meio da curva padrão de Trolox ($y = 0,1889x + 1,8324$; $R^2 = 0,986$), com valores variando entre 0 e 500 $\mu\text{mol/L}$.

O método DPPH foi realizado conforme Brand-Williams; Cuvelier e Berset (1995), com adaptações. Em microplacas, foram adicionados 10 μL da amostra diluída (1:5) e 190 μL de DPPH diluído a 125 $\mu\text{mol/L}$, deixando-se repousar por 30 minutos no escuro. A leitura da absorbância foi medida a 517 nm e as concentrações foram calculadas por meio de curva padrão de Trolox ($y = 0,0699x + 0,2555$; $R^2 = 0,998$), com concentrações entre 50 e 500 $\mu\text{mol/L}$.

Por fim, no método FRAP, adaptado de Benzie e Strain (1996), foi preparada uma solução de FRAP, composta por 10 mM de TPTZ, 40 mM de ácido clorídrico e 20 mM de cloreto férrico (10:1:1). Em cada poço de microplaca, foram adicionados 10 μL de amostra diluída (1:5) e 290 μL da solução FRAP, e deixado reagir em local escuro por 30 minutos. A absorbância foi lida a 593 nm, e as concentrações foram determinadas a partir da curva de calibração de Trolox ($y(\mu\text{mol/L}) = 0,001x + 0,0053$; $R^2 = 0,998$), considerando valores entre 100 e 1000 $\mu\text{mol/L}$.

4.2.2.8 Análises dos componentes de aroma por cromatografia gasosa

Inicialmente, 6 mL de cada amostra foram transferidos para frascos de *headspace* de 20 mL, devidamente selados. Em seguida, os frascos foram incubados a 80 °C por 19 minutos.

Após esse período, uma alíquota de 1 µL da fase gasosa foi automaticamente injetada no sistema de cromatografia gasosa, utilizando a técnica de *headspace* e modo de injeção *splitless*.

Os parâmetros metodológicos foram baseados no modelo de Kliks *et al.* (2021), com adaptações. As análises foram realizadas em cromatógrafo a gás modelo GCMS2010 Plus (Shimadzu, Japão), acoplado a um espectrômetro de massas em tandem do tipo triplo quadruplo (modelo TQ8040), equipado com um autoamostrador AC 5000. O hélio analítico (5.0) foi empregado como gás de arraste.

Para a aquisição dos dados, foi utilizado o software GCMS *Solution*, operando no modo *Full Scan*, com um intervalo de varredura da razão massa-carga (m/z) de 40 a 400. As análises foram conduzidas em coluna capilar SLB-5MS (30 m x 0,25 mm x 0,25 µm), com um fluxo de gás de 1,0 mL/min. A temperatura do injetor foi ajustada para 220 °C, enquanto a fonte de íons foi mantida em 250 °C, e a interface do espectrômetro também operou a 250 °C.

Os dados cromatográficos foram analisados utilizando a comparação dos espectros de massa com as bibliotecas NIST14s.lib e NIST14.lib, permitindo a identificação dos compostos voláteis presentes nas amostras. Para garantir maior precisão na classificação dos compostos, foram considerados apenas aqueles com índice de similaridade superior a 90%, conforme descrito por Kliks *et al.* (2021).

A semiquantificação foi realizada com base na porcentagem da área relativa de cada pico em relação à área total, seguindo metodologias estabelecidas na literatura (Călugăr *et al.*, 2023; Delfino *et al.*, 2023; Jesus *et al.*, 2021; Mattje *et al.*, 2019). Apenas picos com áreas superiores a 0,05% do total foram considerados.

4.2.2.9 Análise sensorial olfativa

A análise sensorial dos atributos de aroma orthonasal das bebidas fermentadas (SI, SII, SIII, SIV e SV) foi realizada por um painel semitreinado com nove avaliadores (sete mulheres e dois homens) com experiência em sidra. A análise sensorial foi conduzida utilizando duas metodologias distintas. A primeira abordagem seguiu o método baseado na frequência de citações (Campo *et al.*, 2010; Hollis; Halpern, 2019; Nanou *et al.*, 2025), no qual os avaliadores assinalaram os descritores aromáticos percebidos em cada amostra, a partir de uma lista pré-definida: floral, frutado, herbáceo, fermentado, terroso, acético, alcoólico, suco de maçã e outros (outros descritores que o avaliador identificar). Permitindo mapear os atributos percebidos pelos avaliadores.

A segunda metodologia foi realizada conforme descrito por Benvenuti *et al.* (2019) com adaptações. Nessa parte da análise envolveu a avaliação de atributos sensoriais previamente definidos, utilizando escalas estruturadas para medir a intensidade, complexidade e qualidade (agradabilidade) das características aromáticas orthonasal de cada amostra. Na avaliação de intensidade do aroma das bebidas definiu-se uma escala de 5 pontos (muito fraco a muito forte). Para a complexidade do aroma foi categorizada em: pouco complexo (1-2 notas aromáticas), moderado (3-4 notas aromáticas) e complexo (5 ou mais notas aromáticas). E para a avaliação da qualidade do foi definido uma escala de 3 pontos, desagradável, neutro ou agradável. Apesar do reduzido número de avaliadores, o teste foi conduzido como estudo piloto para avaliar a percepção de agradabilidade das amostras.

As amostras, codificadas aleatoriamente com números de três dígitos e apresentadas em ordem aleatória (Figura 4.1), foram submetidas aos avaliadores sem qualquer indicação de identidade. Previamente, os avaliadores receberam instruções sobre o preenchimento do questionário digital e sobre a forma correta de inalar e avaliar cada amostra. O projeto de pesquisa foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (COEP), conforme CAAE 62047516.3.0000.0105.

Figura 4.1 - Foto das diferentes amostras de Sidra



Fonte: a autora

Nota: Os números são referentes a cada amostra. 275: Sidra com adição de 50% de extrato de bagaço de maçã (SV); 223: Sidra com adição de 25% de extrato de bagaço de maçã (SIV); 235: Sidra com adição de Floridzina (SII); 286: Sidra controle (SI); e 283: Sidra com adição de Ácido Clorogênico (SIII).

4.2.2.10 Análise estatística

A análise estatística foi aplicada para avaliar diferenças significativas entre as amostras. Os resultados foram apresentados como média $\pm$ desvio padrão. Para identificar diferenças significativas entre as amostras, foi utilizada a análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Fisher LSD ($p < 0,05$). Os dados foram analisados utilizando o software *STATISTICA* versão 8.0 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

Para os componentes de aroma, analisados por cromatografia gasosa, a análise dos dados foi conduzida de forma semiquantitativa, atribuindo resultados com base nas porcentagens das áreas relativas dos picos de cada amostra. O foco foi compreender os padrões e tendências entre as amostras. A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada para explorar a inter-relação entre os parâmetros de aroma e as sidras elaboradas. A PCA reduziu a dimensionalidade dos dados e identificou os principais componentes que explicam a variabilidade observada. As análises de *clustering* e *heatmap* foram realizadas através do site Mapa de calor do Expression (<http://www.heatmapper.ca/expression/>). Na análise sensorial também foi utilizado a análise de correspondência.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Parâmetro cinético da fermentação

A análise dos mostos indicou concentrações médias iniciais de 86,6 g/L de açúcares totais e 117,4 mg/L de nitrogênio total, substratos essenciais para a fermentação (Littleson *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2016). Os parâmetros cinéticos da fermentação são apresentados na Tabela 4.2. Após a fermentação, observou-se uma redução drástica na concentração de açúcares totais, com consumo superior a 99% em todas as amostras. As concentrações finais foram inferiores a 10 g/L; assim, a fermentação foi considerada completa, resultando em sidras secas (Littleson *et al.*, 2023). A análise dos dados indica que as leveduras das fermentações SI e SII apresentaram um período de adaptação mais longo ao meio do que as fermentações dos mostos enriquecidos com extratos fenólicos. As amostras SIV e SV atingiram a velocidade máxima da fermentação (11,5 g/L) em 55 horas (2,3 dias), enquanto a amostra SII levou mais de 79 horas (3,3 dias).

A produção total de dióxido de carbono (CO₂) foi significativamente maior em SV e SIV, sem diferença estatística entre elas, enquanto SI e SII apresentaram os menores valores, principalmente SII. A maior liberação de CO₂ das amostras com extrato fenólico indica uma fermentação mais acelerada e, com isso, pode influenciar as características aromáticas (Cairns *et al.*, 2022). Comparando com a amostra controle, constatou-se que a adição de extratos fenólicos do bagaço de maçã otimizou o processo fermentativo em cerca de 18%, com a conclusão da fermentação em 8,5 dias, enquanto as demais amostras levaram mais de nove dias. Embora a diferença seja pequena, a redução do tempo de fermentação pode trazer benefícios

para a indústria de bebidas, pois a otimização do processo pode reduzir os custos operacionais (Pinto-Neto *et al.*, 2023).

Tabela 4.2 - Parâmetros cinéticos de fermentação alcoólica das sidras artificiais e de maçã

Amostras	Liberação de CO ₂ (g/L)	V _{max} . (g/L.d)	t _{vmax} . (d)	Açúcar residual (g/L)
SI	53,8 ^B ± 0,7	9,0 ^B ± 0,1	3,0 ^{AB} ± 0,1	0,43 ^B ± 0,01
SII	51,7 ^B ± 5,8	8,7 ^B ± 1,0	3,3 ^A ± 0,4	0,45 ^A ± 0,01
SIII	58,9 ^{AB} ± 3,0	9,9 ^B ± 0,4	2,8 ^{ABC} ± 0,4	0,39 ^C ± 0,01
SIV	65,5 ^A ± 1,9	11,5 ^A ± 0,4	2,3 ^C ± 0,4	0,44 ^{AB} ± 0,01
SV	65,8 ^A ± 1,7	11,5 ^A ± 0,4	2,5 ^{BC} ± 0,1	0,46 ^A ± 0,01

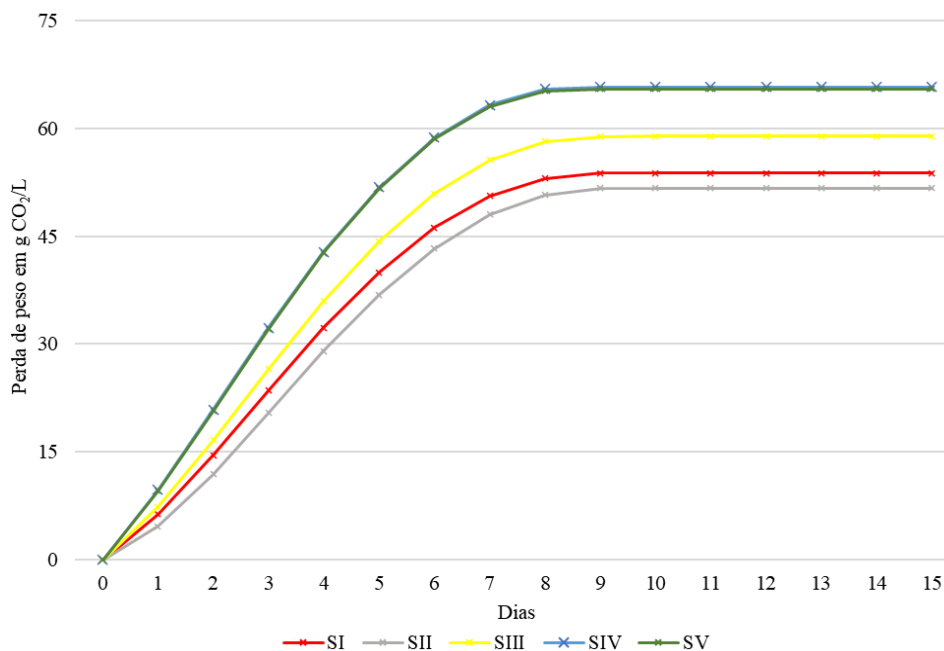
Fonte: A autora

Nota: SI: sidra controle; SII: sidra com floridzina; SIII: sidra com ácido clorogênico; SIV: sidra com 25% de extrato de compostos fenólicos; SV: sidra com 50% de extrato de compostos fenólicos; V_{max}. (g/L.d) = velocidade máxima de fermentação; t_{vmax} = tempo, em dias, que ocorre a velocidade máxima de fermentação. Os resultados expressos em médias de dados obtidos de diferentes fermentações. ^{abc} - letras diferentes dentro da mesma linha indicam diferenças estatísticas (p < 0,05).

O Gráfico 4.1 ilustra a cinética fermentativa, baseada na perda de peso de CO₂ (g CO₂/L) ao longo dos dias de fermentação. Os resultados confirmam que as sidras enriquecidas com extrato tiveram uma fermentação mais rápida e com maior produção de gás carbônico, um indicador direto da atividade metabólica das leveduras: quanto maior a liberação, mais intensa é a atividade fermentativa, resultando em maior consumo de açúcares e formação de etanol (Dinsdale *et al.*, 1999).

O aumento da eficiência fermentativa observada pode ser atribuído à presença de nutrientes adicionais no extrato, que estimulam o crescimento e a atividade das leveduras, otimizando o processo e evitando uma fermentação mais lenta (Bortolini *et al.*, 2020). A influência de compostos fenólicos do extrato também deve ser considerada. A taxa de fermentação pode ser regulada por esses compostos, dependendo de sua estrutura química, concentração e da levedura empregada (Alonso-Salces *et al.*, 2004). Por exemplo, altas concentrações de ácido clorogênico podem acelerar o crescimento de leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, aumentando a velocidade de fermentação e reduzindo o tempo do processo em 2-3 dias, sem comprometer a qualidade e podendo até aumentar a produção de compostos aromáticos (Xiao *et al.*, 2021).

Gráfico 4.1 - Dinâmica da fermentação alcoólica das sidras sob diferentes adições de compostos fenólicos e extratos



Fonte: A autora

Nota: linha vermelha: Sidra controle (SI); linha cinza: Sidra com floridzina (SII); linha amarela: Sidra com ácido clorogênico (SIII); linha azul: sidra com 25% de extrato (SIV); linha verde: sidra com 50% de extrato (SV). Perda de peso de CO₂ por litro de mosto: **(a)** mosto artificial e **(b)** mostos de maçã. Os resultados são referentes as médias das amostras.

A adição de extratos fenólicos do bagaço de maçã ao mosto promoveu uma fermentação mais rápida e eficaz, com maior produção de dióxido de carbono e redução do tempo total do processo, otimizando a produção de sidra, melhorando sua qualidade e reduzindo os custos operacionais.

4.3.2 Caracterização fenólica e antioxidante das sidras e mostos

Teor de fenólicos totais e flavonoides

A caracterização fenólica é essencial para compreender as propriedades antioxidantes e sensoriais de bebidas como sidras e sucos de maçã. A composição desses compostos varia conforme a cultivar e a parte da maçã utilizada (Kalinowska *et al.*, 2014). Durante a fermentação, os polifenóis sofrem transformações devido à atividade das leveduras, impactando as propriedades funcionais e os atributos sensoriais e, consequentemente, sua qualidade final (Zhang *et al.*, 2021).

A análise fenólica apresentou diferenças significativas entre as amostras (Tabela 4.3). O teor de compostos fenólicos totais (TPC) para os mostos variou de 322 mg CAE /L (MI) a

469 mg CAE /L (MII), enquanto o das sidras variou de 204 (SII) a 283 (SV) mg CAE /L. Esses valores ficaram dentro daqueles encontrados por He *et al.* (2022) para sucos (179,1 a 584,4 mg/L) e sidras (182,5 a 695,4 mg/L) de cultivares de maçãs finlandesas. O mosto MII também apresentou a maior concentração do teor de flavonoides - TFC (283 mg CAE/L), enquanto o mosto controle (MI) apresentou as menores concentrações (322 mg CAE/L), mantendo o padrão do TPC. Entre as sidras, a amostra SV se destacou pelas melhores concentrações de TPC e TFC.

A fermentação reduziu o teor de compostos fenólicos e flavonoides totais em todas as sidras. Isso se deve à conversão e a outras reações catalisadas pelas leveduras, que alteram a concentração e o perfil desses compostos (Bortolini *et al.*, 2020; He *et al.*, 2022; Küçükğöz *et al.*, 2024; Ye; Yue; Yuan, 2014). As sidras SI e SV apresentaram redução de aproximadamente 30% nos fenóis totais, enquanto a SII exibiu a maior redução, quase 57%. Pesquisas como as de Benvenuti *et al.* (2022) e Ye; Yue e Yuan (2014) também encontraram concentrações menores desses compostos após a fermentação. A variação na redução observada reflete a composição fenólica específica de cada amostra, pois a ação da levedura sobre cada composto é distinta (Zhang *et al.*, 2021).

Apesar da redução generalizada, a sidra SV manteve níveis de compostos fenólicos superiores aos das demais sidras. Embora a redução durante a fermentação seja inevitável, a manutenção ou o aumento dos polifenóis nas sidras pode ser obtido por meio do enriquecimento com compostos fenólicos recuperados do bagaço de maçã (Bortolini *et al.*, 2020). Nas amostras suplementadas com floridzina e ácido clorogênico, ao final da fermentação, observou-se que os teores de TPC e TFC foram inferiores aos do controle, possivelmente devido à oxidação ou à degradação enzimática ou não enzimática desses compostos (Bortolini *et al.*, 2020).

Atividade antioxidante

A atividade antioxidante das bebidas fermentadas e de seus mostos foi avaliada por três métodos: ABTS, DPPH e FRAP. As bebidas fermentadas apresentaram maiores valores para ABTS, enquanto os métodos DPPH e FRAP indicaram maior atividade para os mostos. A diferença nos resultados obtidos pelas diferentes metodologias pode ser atribuída a efeitos sinérgicos ou antagônicos entre os compostos fenólicos presentes na amostra e às características de cada metodologia (Leonard *et al.*, 2021). Essas diferenças entre os mostos e as sidras estão de acordo com Bortolini *et al.* (2020). Apesar do aumento ou diminuição da atividade, dependendo do método, todas as amostras apresentaram capacidade antioxidante.

Tabela 4.3 - Concentração de fenóis totais (mg CAE/L), flavonoides totais (mg CAT/L), capacidade antioxidante ($\mu\text{mol TE/L}$) pelos métodos de ABTS, DPPH e FRAP e perfil de fenólicos individuais (mg/L) identificados nos mostos e nas sidras

Amostras	MI	MII	MIII	MIV	MV	SI	SII	SAIII	SIV	SV
Compostos fenólicos										
Fenóis Totais	322 ^d $\pm$ 14	469 ^a $\pm$ 7	417 ^b $\pm$ 3	370 ^c $\pm$ 4	410 ^b $\pm$ 6	222 ^g $\pm$ 8	204 ^h $\pm$ 6	211 ^h $\pm$ 4	244 ^f $\pm$ 9	283 ^e $\pm$ 6
Flavonoides	162 ^e $\pm$ 5	283 ^a $\pm$ 7	266 ^b $\pm$ 16	183 ^d $\pm$ 2	235 ^c $\pm$ 2	164 ^e $\pm$ 7	160 ^e $\pm$ 9	111 ^f $\pm$ 6	152 ^e $\pm$ 5	178 ^d $\pm$ 5
Atividade Antioxidante										
ABTS	477 ^{ab} $\pm$ 1	441 ^c $\pm$ 1	398 ^d $\pm$ 1	446 ^c $\pm$ 2	462 ^{bc} $\pm$ 5	479 ^{ab} $\pm$ 2	487 ^a $\pm$ 1	483 ^{ab} $\pm$ 1	483 ^{ab} $\pm$ 1	484 ^{ab} $\pm$ 1
DPPH	1932 ^d $\pm$ 58	1647 ^e $\pm$ 83	2711 ^a $\pm$ 58	2242 ^c $\pm$ 43	2597 ^b $\pm$ 93	1704 ^e $\pm$ 39	1490 ^f $\pm$ 47	1543 ^f $\pm$ 42	1923 ^d $\pm$ 56	2154 ^c $\pm$ 36
FRAP	1095 ^e $\pm$ 23	1525 ^d $\pm$ 48	1748 ^b $\pm$ 93	1800 ^b $\pm$ 75	1877 ^a $\pm$ 88	1035 ^{ef} $\pm$ 28	942 ^g $\pm$ 36	973 ^{fg} $\pm$ 42	867 ^h $\pm$ 17	1620 ^c $\pm$ 43
Fenóis Individuais										
Σ Ácidos Hidroxicinâmicos	58,9	41,0	122,0	65,2	54,7	60,2	62,1	110,4	59,1	69,2
Ácido Clorogênico	49,9 ^f $\pm$ 0,4	35,2 ^h $\pm$ 0,1	113,5 ^a $\pm$ 0,3	56,0 ^{de} $\pm$ 1	44,8 ^g $\pm$ 1	56,3 ^d $\pm$ 1	49,1 ^f $\pm$ 1	99 ^b $\pm$ 0,1	55,3 ^e $\pm$ 1	64,9 ^c $\pm$ 1
Ácido Cumárico	9,0 ^{ab} $\pm$ 0,3	5,8 ^e $\pm$ 0,2	8,5 ^c $\pm$ 0,2	6,9 ^d $\pm$ 0,3	6,9 ^d $\pm$ 0,1	-	9,4 ^a $\pm$ 0,3	8,9 ^{bc} $\pm$ 0,1	-	-
Ácido Cafeico	-	-	-	2,3 ^d $\pm$ 0,2	3,0 ^c $\pm$ 0,3	3,9 ^b $\pm$ 0,1	3,6 ^b $\pm$ 0,2	2,7 ^c $\pm$ 0,2	3,8 ^b $\pm$ 0,3	4,3 ^a $\pm$ 0,1
Flavonoides										
Σ Flavan-3-óis	20,1	0	0	35,7	37,1	41,6	39,1	34,3	67,5	75,1
Catequina	5,6 ^f $\pm$ 0,2	-	-	7,9 ^e $\pm$ 0,4	7,6 ^e $\pm$ 0,2	33,8 ^b $\pm$ 0,4	32,4 ^c $\pm$ 1	15,4 ^d $\pm$ 0,4	33,5 ^b $\pm$ 0,4	36,4 ^a $\pm$ 0,4
Procianidina B1	14,5 ^f $\pm$ 1	-	-	27,8 ^b $\pm$ 0,4	29,5 ^a $\pm$ 1	7,8 ^g $\pm$ 0,2	6,7 ^h $\pm$ 1	18,9 ^e $\pm$ 0,2	23,4 ^d $\pm$ 0,4	25,5 ^c $\pm$ 0,2
Procianidina B2	-	-	-	-	-	-	-	-	10,6 ^b $\pm$ 0,3	13,2 ^a $\pm$ 0,4
Σ Dihidrochalconas	9,9	9,4	6,3	9,8	11,5	8,5	11,2	8,2	16,2	27,6
Floridzina	9,9 ^d $\pm$ 0,2	9,4 ^d $\pm$ 1	6,3 ^f $\pm$ 0,2	9,8 ^d $\pm$ 0,2	11,5 ^c $\pm$ 0,2	8,5 ^e $\pm$ 0,4	11,2 ^c $\pm$ 0,5	8,2 ^d $\pm$ 2	16,2 ^b $\pm$ 0,3	27,6 ^a $\pm$ 0,1
Σ Flavonóis	-	-	-	2,8	3,7	-	-	-	6,2	26,6
Quercetina-3-Rutinósídeo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,2 $\pm$ 1
Quercetina-3- β -D-Glucosídeo	-	-	-	2,8 ^b $\pm$ 0,1	3,7 ^a $\pm$ 0,1	-	-	-	-	3,8 ^a $\pm$ 0,1
Quercetina-3-D-Galactosídeo	-	-	-	-	-	-	-	-	6,2 ^a $\pm$ 0,1	5,3 ^b $\pm$ 0,4
Quercetina-3-O-Ramnosídeo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,3 $\pm$ 0,1
Σ	88,9	50,4	128,3	113,5	110	110,3	112,4	152,9	149	198,5

Fonte: A autora

Nota: MI: mosto controle; MII: mosto com floridzina; MIII: mosto com ácido clorogênico; MIV: mosto com 25% de extrato de compostos fenólicos; MV: mosto com 50% de extrato de compostos fenólicos; SI: sidra controle; SII: sidra com floridzina; SAIII: sidra com ácido clorogênico; SIV: sidra com 25% de extrato de compostos fenólicos; SV: sidra com 50% de extrato de compostos fenólicos; ^{abc} - letras diferentes dentro da mesma linha indicam diferenças estatísticas ($p < 0,05$); -: o composto não foi detectado pela metodologia

Estudos anteriores sugerem que a floridzina apresenta menor eficácia na atividade antioxidante em comparação com outros compostos fenólicos (Li *et al.*, 2018; Lu; Foo, 2000). No entanto, ela pode desempenhar um papel importante na prevenção de doenças, como o diabetes melito tipo 2, ao influenciar os níveis de glicose no sangue e reduzir a sua absorção no intestino (Niederberger; Tennant; Bellion, 2020).

Compostos fenólicos individuais

Os mostos de maçã apresentaram diversos compostos fenólicos, sendo os ácidos hidroxicinâmicos e os flavan-3-óis as principais classes detectadas. Tais classes de compostos fenólicos exercem influência sobre atributos como aroma, amargor, adstringência e cor da bebida (Mu *et al.*, 2023). No entanto, o impacto desses compostos na qualidade final é variável, dependendo do estilo de sidra almejado e do perfil sensorial desejado. A predominância de ácidos hidroxicinâmicos em sucos foi observada por He *et al.* (2022) em diversas variedades de maçãs finlandesas, incluindo *Alasen Punainen*, *Kersti*, *Lepaan Meloni*, *Lohjan Kirkas*, *Aino*, *Gustavs Bästa*, *Luotsi*, *Pieksämäki*, *Turso* e *Juuso*.

Os flavan-3-óis apresentaram forte correlação com a atividade antioxidante medida pelo método FRAP ($r = 0,99$, $p < 0,05$), provavelmente devido à presença de procianidina B1, um composto com alta atividade antioxidante (Alberti *et al.*, 2016). Observou-se também forte correlação entre a atividade antioxidante medida por DPPH e os ácidos hidroxicinâmicos ($r = 0,91$, $p < 0,05$) e flavonóis ($r = 0,90$, $p < 0,05$), assim como entre FRAP e os flavonóis ($r = 0,92$, $p < 0,05$).

Em todas as amostras, observaram-se alterações no perfil de compostos fenólicos individuais, com variações nas concentrações e formação de novos compostos. A amostra SV, por exemplo, apresentou procianidina B2 e diferentes formas de quercetina após a fermentação. Essas transformações podem estar relacionadas a reações bioquímicas induzidas pelas leveduras, como glicosilação, deglicossilação e degradação enzimática das paredes celulares (Bortolini *et al.*, 2020; Leonard *et al.*, 2021; Minnaar *et al.*, 2017; Ye; Yue; Yuan, 2014). As reações de hidrólise também contribuem para o aumento de alguns compostos fenólicos, gerando novos fenóis a partir dos compostos originais (Benvenuti *et al.*, 2019; Ye; Yue; Yuan, 2014). Esses resultados são consistentes com os achados de Bortolini *et al.* (2020), que identificaram um aumento nas principais classes fenólicas em amostras fermentadas enriquecidas.

Ao comparar os mostos e sidras, a SV apresentou melhores parâmetros gerais, enquanto os mostos enriquecidos se destacaram em parâmetros mais específicos. Esses resultados corroboram estudos anteriores de Bortolini *et al.* (2020) e Benvenuti *et al.* (2019), que demonstram a importância dos compostos fenólicos na qualidade das bebidas fermentadas.

O enriquecimento com extrato fenólico elevou a concentração de compostos bioativos e a capacidade antioxidante. As maiores concentrações de ácido clorogênico, catequina e floridzina nas amostras enriquecidas podem sugerir benefícios funcionais adicionais e melhorias no aroma. Mas altas concentrações de ácidos hidroxicinâmicos e procianidinas podem influenciar negativamente a adstringência e o amargor (He *et al.*, 2022).

4.3.3 Influência da adição de extratos fenólicos nas propriedades de cor e aroma

A análise colorimétrica é fundamental para a caracterização visual das bebidas. A adição de compostos bioativos e o processo de fermentação influenciaram as mudanças na cor em relação à bebida padrão, conforme descrito na Tabela 4.4. Constatou-se que a incorporação de extrato influenciou significativamente sobre a cor de todos os mostos e sidras.

Tabela 4.4 - Análise de colorimétrica do mosto de maçã e sidra natural

Amostra	L*	a*	b*	Chroma	Ângulo Hue
MI	88,2 ^C ± 0,1	-0,2 ^E ± 0,1	62,9 ^D ± 0,1	62,9 ^D ± 0,1	90,2 ^E ± 0,1
MII	82,9 ^D ± 1,2	5,2 ^C ± 0,2	69,6 ^B ± 0,4	69,8 ^B ± 0,4	85,8 ^G ± 0,1
MIII	81,9 ^E ± 0,1	7,2 ^B ± 0,1	71,5 ^A ± 0,1	71,9 ^A ± 0,1	84,3 ^H ± 0,1
MIV	81,0 ^F ± 0,1	3,5 ^D ± 0,1	66,1 ^C ± 0,1	66,2 ^C ± 0,1	86,9 ^F ± 0,1
MV	73,4 ^G ± 0,1	8,6 ^A ± 0,1	71,7 ^A ± 0,3	72,2 ^A ± 0,3	83,2 ^I ± 0,1
SI	94,9 ^A ± 0,1	-2,7 ^H ± 0,1	27,6 ^G ± 0,1	27,8 ^G ± 0,1	95,5 ^A ± 0,1
SII	95,0 ^A ± 0,1	-2,6 ^H ± 0,1	27,6 ^G ± 0,1	27,7 ^G ± 0,1	95,4 ^{AB} ± 0,2
SIII	94,5 ^A ± 0,4	-2,5 ^H ± 0,1	27,6 ^G ± 0,1	27,7 ^G ± 0,1	95,3 ^B ± 0,1
SIV	94,3 ^{AB} ± 0,1	-2,4 ^G ± 0,1	29,2 ^F ± 0,1	29,3 ^F ± 0,1	94,7 ^C ± 0,1
SV	93,8 ^B ± 0,2	-2,2 ^F ± 0,1	31,4 ^E ± 0,2	31,4 ^E ± 0,2	93,9 ^D ± 0,1

Fonte: A autora

Nota: SI: sidra controle; SII: sidra com floridzina; SIII: sidra com ácido clorogênico; SIV: sidra com 25% de extrato de compostos fenólicos; SV: sidra com 50% de extrato de compostos fenólicos; MI: mosto controle; MII: mosto com floridzina; MIII: mosto com ácido clorogênico; MIV: mosto com 25% de extrato de compostos fenólicos; MV: mosto com 50% de extrato de compostos fenólicos; ^{abc} - letras diferentes dentro do mesmo grupo de análise indicam diferenças estatísticas; ^{ABC} - letras diferentes dentro do mesmo grupo de análise indicam diferenças estatísticas.

A adição de extratos reduziu a luminosidade (L*) das amostras, efeito também observado após a fermentação em todas as amostras. No parâmetro a*, que mede a variação entre o verde (-) e o vermelho (+), as sidras apresentaram valores negativos, que correspondem ao verde. Entre os mostos, o controle (MI) exibiu tonalidade mais esverdeada, porém, a coloração tornou-

se mais avermelhada (valores positivos) com a incorporação de compostos fenólicos. A fermentação, assim como as adições, provocaram mudanças em a^* , indicando que essa mudança está associada ao processo fermentativo com as adições de compostos fenólicos.

Todas as amostras apresentaram valores positivos para b^* , indicando coloração amarela, e os mostos apresentaram uma maior intensidade nessa coloração. Contudo, durante o processo de fermentação, foi observada uma redução nos valores de b^* . A coloração amarela observada pode ser atribuída à presença de flavonoides, principalmente flavonóis, no extrato do bagaço de maçã (Benvenuti *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2021), e aos produtos do escurecimento enzimático (Février *et al.*, 2017). A variação da tonalidade de b^* após a fermentação resulta da oxidação de compostos como floridzina e catequina pela enzima polifenol oxidase presente na maçã (Deun *et al.*, 2015; Février *et al.*, 2017).

Resultados semelhantes foram relatados por Bortolini *et al.* (2020), que observaram valores de L^* mais altos e valores de a^* e b^* mais baixos nos produtos fermentados. Esses achados corroboram os resultados deste estudo, confirmando a influência do processo fermentativo e da retenção de compostos fenólicos pelas leveduras nas características cromáticas das amostras.

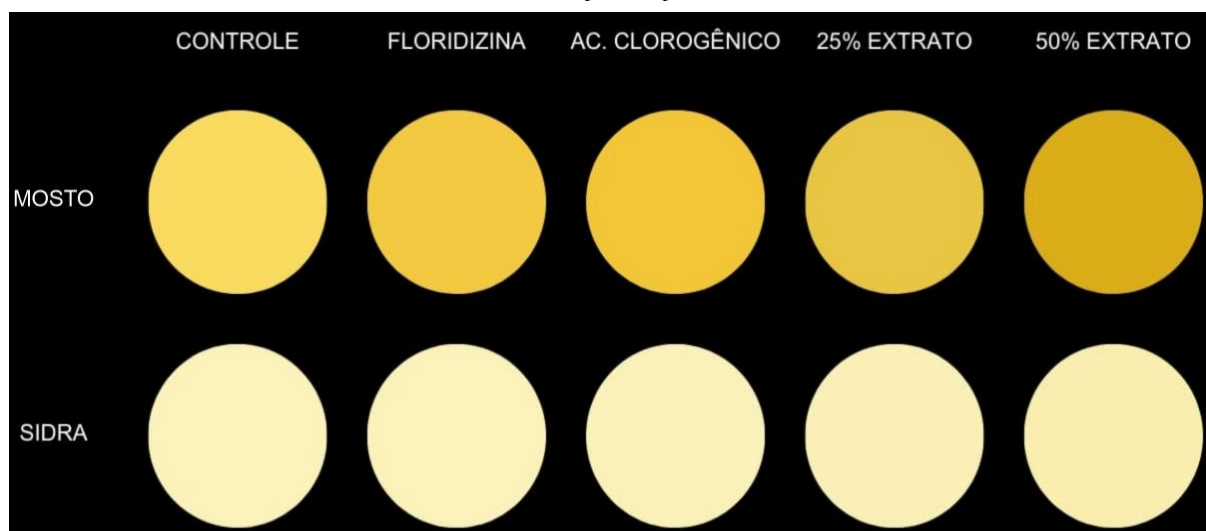
O *croma*, que reflete a intensidade ou pureza da cor em relação ao cinza, variou entre as amostras. Os mostos apresentaram valores mais elevados para *croma* do que as sidras, e a adição de extratos resultou em bebidas fermentadas com cores mais intensas. Quanto ao ângulo *hue*, todas as amostras se posicionaram próximo a 90° , indicando uma tonalidade amarela.

A adição de compostos fenólicos e a fermentação modificaram a composição e a aparência final das bebidas. A interação entre leveduras e compostos fenólicos liberou substâncias que alteraram a pigmentação e a estabilidade da cor (Alberti *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2021). A oxidação de alguns desses compostos durante a fermentação também afeta a coloração final da sidra (Bortolini *et al.*, 2020). Portanto, a adição de extratos fenólicos do bagaço de maçã, corroborando os achados de Benvenuti *et al.* (2019; 2022), teve impacto significativo na color das bebidas fermentadas.

A Figura 4.2 confirma visualmente o impacto da adição de compostos fenólicos e da fermentação alcoólica na coloração das bebidas. Compostos como ácido clorogênico, floridzina e catequina, contribuíram para tons de laranja e amarelo, resultado da oxidação ou da presença de seus precursores (Deun *et al.*, 2015; Février *et al.*, 2017). O controle dos parâmetros que influenciam a cor é, portanto, essencial para a indústria de bebidas, permitindo a elaboração de

produtos visualmente atraentes e de maior apelo de mercado, uma vez que a aparência é o primeiro atributo sensorial percebido (Wang *et al.*, 2024).

Figura 4.2 – Representação visual das cores das diferentes amostras de mostos e sidras com base nas coordenadas colorimétricas obtidas por espectrofotometria



Fonte: A autora. As imagens foram elaboradas com auxílio do site: <https://colordesigner.io/convert/labtorgb>

O aroma é um fator determinante da qualidade de bebidas derivadas da maçã, como mostos e sidras. Os compostos voláteis são os principais responsáveis pelo aroma, mas são influenciados por diversas outras substâncias químicas presentes na matriz alimentar (Mu *et al.*, 2023; Robinson *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2021). A volatilidade e solubilidade desses compostos são afetadas pelo etanol, polifenóis e proteínas, os quais podem alterar significativamente a percepção do aroma (Mu *et al.*, 2023; Pittari; Moio; Piombino, 2021). As interações entre compostos voláteis e fenóis são complexas, afetando a volatilidade, a liberação e a percepção do aroma (Wang, S. *et al.*, 2022). Essas interações dependem da estrutura, concentração e do meio em que se encontram esses compostos (Lorrain *et al.*, 2013; Wang, S. *et al.*, 2022).

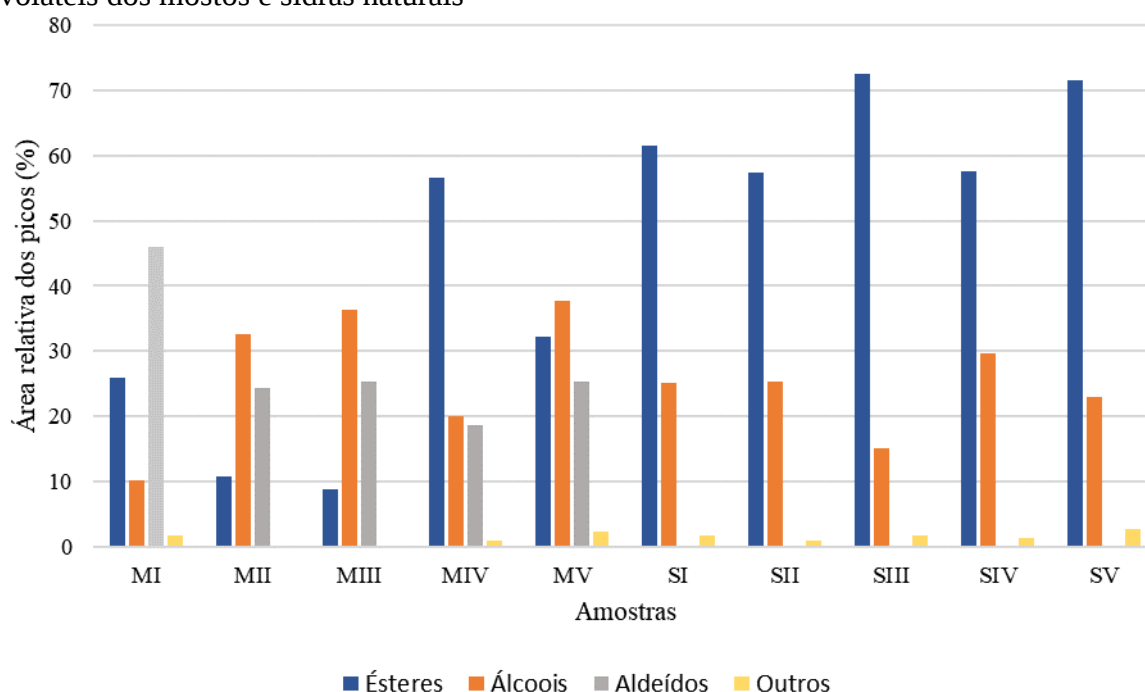
As principais classes de compostos voláteis em bebidas à base de maçã incluem ésteres, álcoois superiores, ácidos, aldeídos, cetonas e terpenos, que contribuem para o desenvolvimento do aroma (Alberti *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2023). A composição desses voláteis varia em função de diversos fatores, como a cultivar da fruta, estágio de maturação, condições de fermentação, levedura utilizada, região de cultivo, temperatura, processamento e aditivos (Alberti *et al.*, 2016; Lin; Warmund; Kwasniewski, 2024).

A formação do aroma das bebidas fermentadas é influenciada por três fontes principais: (1) os metabólitos produzidos pelas leveduras, que conferem características

aromáticas próprias e cuja formação independe da fruta, embora suas concentrações sejam influenciadas pela disponibilidade de substratos; (2) compostos formados pela ação das leveduras sobre os componentes da fruta; e (3) compostos voláteis naturalmente presentes na fruta, que permanecem inalterados após fermentação (Lin; Warmund; Kwasniewski, 2024). É importante destacar também a interação entre compostos voláteis e fenólicos (Wang, S. *et al.*, 2022; Lorrain *et al.*, 2013).

A análise dos compostos voláteis de mostos e sidras apresentou variações nos percentuais das classes de voláteis, com a identificação de 44 compostos voláteis aromáticos (Tabela 4.5). Os ésteres foram a classe predominante (56,8%), seguidos dos álcoois (22,7%), aldeídos (11,4%) e outros (9%). Essas variações estão relacionadas à fermentação e à adição de compostos fenólicos, como encontrado por Braga *et al.* (2013). Entre as amostras de mosto, a MIV apresentou a maior concentração de ésteres (aproximadamente 57% da área dos picos), enquanto as sidras SIII e SV exibiram concentrações superiores a 70% (Gráfico 4.2). Esses compostos já foram identificados e descritos em estudos anteriores sobre sucos e sidras (Pando Bedriñana *et al.*, 2020; Orellana-Palma *et al.*, 2020), e contribuem para o aroma dessas bebidas.

Gráfico 4.2 - Áreas relativas da somatória dos picos (%) das principais classes de compostos voláteis dos mostos e sidras naturais



Fonte: A autora

Nota: MI: mosto controle; MII: mosto com floridzina; MIII: mosto com ácido clorogênico; MIV: mosto com 25% de extrato de compostos fenólicos; MV: mosto com 50% de extrato de compostos fenólicos; SI: sidra controle; SII: sidra com floridzina; SIII: sidra com ácido clorogênico; SIV: sidra com 25% de extrato de compostos fenólicos; SV: sidra com 50% de extrato de compostos fenólicos.

Embora os mostos apresentassem concentrações relevantes de aldeídos, esses compostos diminuíram ou desapareceram após a fermentação devido à atividade das leveduras, invertendo a proporção em relação aos ésteres em todas as amostras (Wei; Zhang; Wang *et al.*, 2020).

No mosto de maçã controle (MI), foram identificados 10 compostos voláteis, com predominância de ésteres (5 compostos), que são os principais responsáveis pelo aroma característico da maçã. O acetato de butila, que confere o aroma frutado, destaca-se entre eles (Orellana-Palma *et al.*, 2020; Nikfardjam; Maier, 2011; Wei; Zhang; Qiu *et al.*, 2020). Os aldeídos constituíram a maior fração de compostos voláteis, representando mais de 45% do total, com o hexanal como compostos mais abundante na amostra MI (36%). Este composto pode contribuir para notas aromáticas doce, de maçã verde e fresca (Hashizume; Gordon; Mottram, 2007; He *et al.*, 2021). No entanto, o hexanal, assim como o 2-hexenal, presentes no suco de maçã, tendem a desaparecer durante a fermentação alcoólica (He *et al.*, 2021; Nikfardjam; Maier, 2011).

A composição dos voláteis depende de vários fatores, como senescência, variedade, técnica de extração e armazenamento (Braga *et al.*, 2013). No entanto, alguns compostos voláteis aparecem em grande frequência em sucos de maçã, independentemente da cultivar e das técnicas de extração, como é o caso de acetato de etila, 1-butanol e álcool isoamílico (Mao *et al.*, 2020; Medina *et al.*, 2019; Nikfardjam; Maier, 2011). Esses compostos são característicos do aroma da maçã, contribuindo para o seu reconhecimento. Braga *et al.* (2013) estudaram os compostos voláteis presente no suco de maçã Gala, identificando acetato de etila, acetaldeído, lactato de etila e acetato de isoamila como os de maior concentração. A pesquisa também confirmou a presença de alguns desses compostos relatados em pesquisas anteriores.

Em todas as amostras, ésteres e álcoois estavam presentes, embora em concentrações variáveis. Essa predominância de ésteres e álcoois também foi achada no estudo de Fouad *et al.* (2021) e é consistente com os resultados de estudos anteriores que identificaram compostos voláteis similares na amostra controle (Medina *et al.*, 2019; Orellana-Palma *et al.* 2020; Perestrelo *et al.*, 2019; Wei; Zhang; Qiu, 2020).

Tabela 4.5 - Composição dos compostos voláteis aromáticos (em porcentagem da área total dos picos) detectados por Cromatografia Gasosa nos Mostos e Sidras de maçã

	(continua)									
Compostos*	MI	MII	MIII	MIV	MV	SI	SII	SIII	SIV	SV
Ésteres (25)										
Acetato de etila	-	-	-	2,6	1,5	9,5	12,0	15,8	11,7	-
Isobutirato de etila	-	-	-	-	-	-	-	0,8	-	-
Acetato de propila	-	-	-	14,3	-	7,8	7,6	18,5	4,6	15,5
Caproato de etila	-	-	-	-	-	1,2	1,3	1,4	2,2	-
Caprilato de etila	-	-	-	-	-	5,9	7,1	6,7	7,3	2,3
Caprato de etila	-	-	-	-	-	7,9	7,5	4,7	9,6	5,0
Acetato de isobutila	7,1	-	-	5,9	-	7,5	5,7	9,0	6,0	14,3
Caprilato de isoamila	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-
Laurato de etila	-	-	-	-	-	1,5	0,1	-	1,4	1,6
Acetato de 2-metilbutila	3,2	6,6	6,8	3,0	2,4	-	-	-	-	-
Acetato de hexila	1,0	3,0	2,0	3,8	3,2	0,1	-	0,1	0,2	-
Acetato de butila	12,9	-	-	26,9	23,6	12,5	10,2	8,5	7,9	19,5
Acetato de pentila	-	-	-	0,2	0,2	-	-	-	-	-
Acetato de heptila	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	-
Butanoato de etila	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	-
Isovalerato de etila	-	-	-	-	-	5,1	4,3	5,3	3,8	9,9
3-Hexenoato de etila	-	-	-	-	-	1,2	0,6	1,3	0,8	1,9
9-Decenoato de etila	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	-
Decanoato isoamila (isopentila)	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	0,1
Acetato de linalila	1,7	-	-	0,2	0,3	-	-	-	-	-
Acetato de isoamila	-	-	-	-	-	0,8	0,9	1,2	1,5	0,9
Benzoato de metilo	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Miristato de etila	-	-	-	-	-	0,1	-	-	0,1	0,1
Palmitato de metila	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	0,3
Linolato de etila	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1
Álcoois (10)										
Álcool isoamílico	-	-	-	-	-	24,2	24,4	10,4	28,4	4,3
1-Butanol	-	5,4	6,3	14,4	24,0	-	-	0,1	0,1	-
2,3-Butanodiol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1
2-Metil-1-butanol	4,1	9,1	10,0	1,3	3,4	-	-	1,7	-	16,0
2-Hexen-1-ol	-	1,2	1,1	0,1	0,2	-	-	-	-	-
1-Hexanol	6,1	16,8	19,0	4,2	7,0	0,5	0,5	0,6	0,6	0,2

Tabela 4.5 - Composição dos compostos voláteis aromáticos (em porcentagem da área total dos picos) detectados por Cromatografia Gasosa nos Mostos e Sidras de maçã

Compostos*	(conclusão)									
	MI	MII	MAIII	MIV	MV	SI	SII	SAIII	SIV	SV
Álcool feniletílico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2
2-Octen-1-ol (E)	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-
1-Octen-3-ol	-	-	-	-	0,6	-	-	-	-	-
Isobutanol	-	-	-	-	2,3	0,5	0,4	2,3	0,5	1,1
Aldeídos (5)										
Hexanal	36,3	17,9	19,7	16,8	18,8	-	-	-	-	-
2-Hexenal (E)	9,7	4,9	5,0	1,1	3,4	-	-	-	-	-
2-Heptenal (E)	-	-	-	0,6	2,7	-	-	-	-	-
Benzaldeído	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-
Nonanal	-	1,5	0,7	0,2	0,3	0,1	-	-	-	0,1
Outros (4)										
D-limoneno	-	-	-	0,4	2,0	-	-	-	-	0,1
2-Octanona	1,6	-	-	0,4	-	1,7	0,8	1,7	1,2	2,3
6-Metil-5-hepten-2-ona	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-
Ácido acético	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3

Fonte: A autora

Nota: MI: mosto controle; MII: mosto com floridzina; MAIII: mosto com ácido clorogênico; MIV: mosto com 25% de extrato de compostos fenólicos; MV: mosto com 50% de extrato de compostos fenólicos; SI: sidra controle; SII: sidra com floridzina; SAIII: sidra com ácido clorogênico; SIV: sidra com 25% de extrato de compostos fenólicos; SV: sidra com 50% de extrato de compostos fenólicos. * Resultados em % de área. Resultados segundo a biblioteca do CG-MS; -: não detectado.

A adição de compostos fenólicos ou extratos fenólicos às amostras de mosto provocou alterações no perfil de compostos voláteis aromáticos, pois os fenólicos podem atuar como moduladores ou precursores de diversos compostos aromáticos, modificando a composição, concentração, volatilidade e solubilidade desses compostos. A ação precursora é desencadeada pela interação dos fenólicos com a matriz alimentar, bem como por sua degradação (Marcotte; Stewart; Fustier, 1998). Esse processo contribui para a formação de novos compostos responsáveis pelo aroma, conforme documentado por Marcotte; Stewart e Fustier (1998). Enquanto a modulação desses compostos ocorre por meio da interação com compostos voláteis, afetando sua solubilidade e volatilidade (Guo; Yue; Yuan, 2019, Mu *et al.*, 2023; Sobczak *et al.*, 2022). Os compostos fenólicos, por exemplo, influenciam a retenção ou liberação de compostos voláteis, dependendo da afinidade destes com a água, determinada por suas propriedades hidrofílicas ou hidrofóbicas (Pittari; Moio; Piombino, 2021).

Entre os mostos, as amostras MII, MIII e MV apresentaram maior proporção de álcoois, enquanto os ésteres foram predominantes em MIV, refletindo características frutadas e florais. Em relação à diversidade de compostos, MII e MIII apresentaram menor variedade, mas com compostos dominantes como acetato 2-metilbutila, 2 metil-1-butanol, 1-hexanol e nonanal, que podem conferir notas frutais, cítricas, florais, herbáceas e álcoois (He *et al.*, 2021; Nikfardjam; Maier, 2011; Sevindik *et al.*, 2022; Wei; Zhang; Wang *et al.*, 2020).

O perfil aromático da amostra MIV sugere notas adocicadas, frutadas, florais e herbáceas. Entretanto, a presença de 2-heptenal, produto formado durante a autooxidação do ácido linoleico, pode contribuir com notas desagradáveis (Hashizume; Gordon; Mottram, 2007; Mayr *et al.*, 2015). Enquanto o d-limoneno, identificado nas amostras de mosto (MIV e MV) e na sidra SV, destaca-se como um importante contribuinte aromático, conferindo notas cítricas características de laranja e limão (Peng *et al.*, 2021).

O mosto MV destacou-se por apresentar maior variedade e concentração de compostos, incluindo acetato de etila, acetato de propila, acetato de hexila, acetato de pentila, acetato de heptila, caprilato de etila, caprinato de etila, 1- butanol, 2-hexen-1-ol, 1-octen-3-ol, nonanal e isobutanol, os quais proporcionam notas frutadas (maçã), florais, cítricas, verdes e doces (He *et al.*, 2021; Kliks *et al.*, 2021; Kostyra *et al.*, 2021; Qin; Petersen; Bredie, 2018; Sevindik *et al.*, 2022; Villière *et al.*, 2015; Wei; Zhang; Wang *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019). Apesar da predominância de compostos que conferem aromas agradáveis, o MV também apresentou compostos que podem ser associados a aromas indesejáveis, como 2-heptenal, e 6-metil-5-hepten-2-ona (picante, terroso e gorduroso) (Hashizume; Gordon; Mottram, 2007).

Ao comparar mostos e sidras, observou-se um aumento expressivo nos compostos aromáticos, especialmente no perfil de ésteres, em algumas sidras. As porcentagens da área dos picos cromatográficos das sidras variaram de 0,9 % a 63,8% nas amostras SIV e SIII, respectivamente. Esse aumento pode ser atribuído à ação das leveduras durante a fermentação, que decompõem açúcares e compostos fenólicos, favorecendo a formação de ésteres responsáveis pelos aromas frutados, doces e agradáveis à bebida (Benvenuti *et al.*, 2019). Além disso, a fermentação alcoólica, por leveduras como *Saccharomyces cerevisiae*, metaboliza aminoácidos (aspartato, asparagina e glutamato) em ésteres, álcoois e ácidos, contribuindo para o perfil aromático da bebida (Santos *et al.*, 2015). Os ésteres, de modo geral, mesmo em pequenas quantidades, desempenham um papel importante na caracterização do aroma (Călugăr *et al.*, 2023), enquanto os álcoois superiores, em baixas concentrações (menores que 300 mg/L) contribuem para a complexidade aromática; e altas concentrações podem ter efeitos negativos (Braga *et al.*, 2013).

A fermentação com *Saccharomyces cerevisiae* impactou o perfil aromático da sidra controle (SI), resultando na formação de 16 novos compostos voláteis e na degradação de cinco outros. Esse processo demonstra a transformação de substratos em metabólitos, subprodutos e precursores de aroma, modificando as notas aromáticas primárias e gerando notas secundárias (Daccache *et al.*, 2020). A composição dos ésteres nas sidras revelou sete compostos predominantes: acetato de etila, caprilato de etila, acetato de butila, caprinato de etila, acetato de propila, isovalerato de etila e acetato de isobutila. Todos esses ésteres estavam presentes em altas concentrações em todas as amostras de sidras analisadas, exceto o acetato de etila, ausente na amostra SV. Muitos desses ésteres também foram identificados em estudos anteriores sobre sidras, como os realizados por Kliks *et al.* (2021) e Qin; Petersen e Bredie (2018).

Os aldeídos, presentes nos mostos praticamente desapareceram após o processo fermentativo, restando apenas o nonanal em baixa concentração na sidra SV. Essa redução provavelmente se deve à ação de enzimas, como a álcool desidrogenase, que convertem aldeídos em álcoois durante a fermentação, como por *Saccharomyces cerevisiae* (Klosowski *et al.*, 2017; Smit *et al.*, 2006). Observações semelhantes foram relatadas por He *et al.* (2021), que constataram o desaparecimento completo de aldeídos como butanal, hexanal e hex-2-enal (E), após a fermentação. Alguns dos álcoois produzidos podem ainda sofrer esterificação, contribuindo a formação de ésteres e melhorando o perfil sensorial da sidra (He *et al.*, 2021).

Foi observada a formação de 2-octanona na maioria das amostras, uma cetona conhecida por conferir notas aromáticas florais, frutadas, amargas e verdes (Yu *et al.*, 2019).

Outro composto relevante, presente em todas as sidras, foi o álcool isoamílico, formado pela degradação da leucina pelas leveduras *Saccharomyces cerevisiae* (Song *et al.*, 2024). Esse composto é um dos principais álcoois da sidra, remetendo a aromas de uísque e malte (He *et al.*, 2021; Qin; Petersen; Bredie, 2018).

A adição de floridzina e ácido clorogênico influenciou o perfil dos compostos aromáticos das sidras. No entanto, na amostra SII, a intensidade dos compostos voláteis foi menor que nas demais amostras com adição de fenólicos. Isso provavelmente se deve à baixa concentração de floridzina adicionado, uma vez que, segundo Guo; Yue; Yuan (2019), são necessárias altas concentrações dessa substância para intensificar o aroma. A amostra SIII, por outro lado, apresentou maior produção de compostos frutados, como isobutirato de etila e acetato de propila (Feng *et al.*, 2022; Qin; Petersen; Bredie, 2018), com um aumento de 140% em relação ao controle. A sidra com 25% de fenóis (SIV) apresentou perfil aromático semelhante ao de SI, embora com diferenças nas concentrações de alguns compostos e a presença adicional de butanoato de etila (notas doces) e 1-butanol (nota de vinho), podendo trazer mais complexidade e intensidade ao aroma (Yu *et al.*, 2019).

A amostra SV apresentou diferenças notáveis em relação às demais amostras fermentadas, como a degradação completa ou a não identificação do acetato de etila, um dos compostos característicos de muitas sidras (Bingman *et al.*, 2020; Wei; Zhang; Qiu *et al.*, 2020; Qin; Petersen; Bredie, 2018; Sola *et al.*, 2024). O desaparecimento do acetato de etila pode estar relacionado à sua maior retenção na amostra e à inibição da volatilidade, pois, de acordo com Zhang *et al.* (2022), ácidos fenólicos têm esse efeito, principalmente o ácido cafeico. Além disso, houve um aumento na concentração de acetato de propila, comportamento semelhante ao encontrado na amostra SIII.

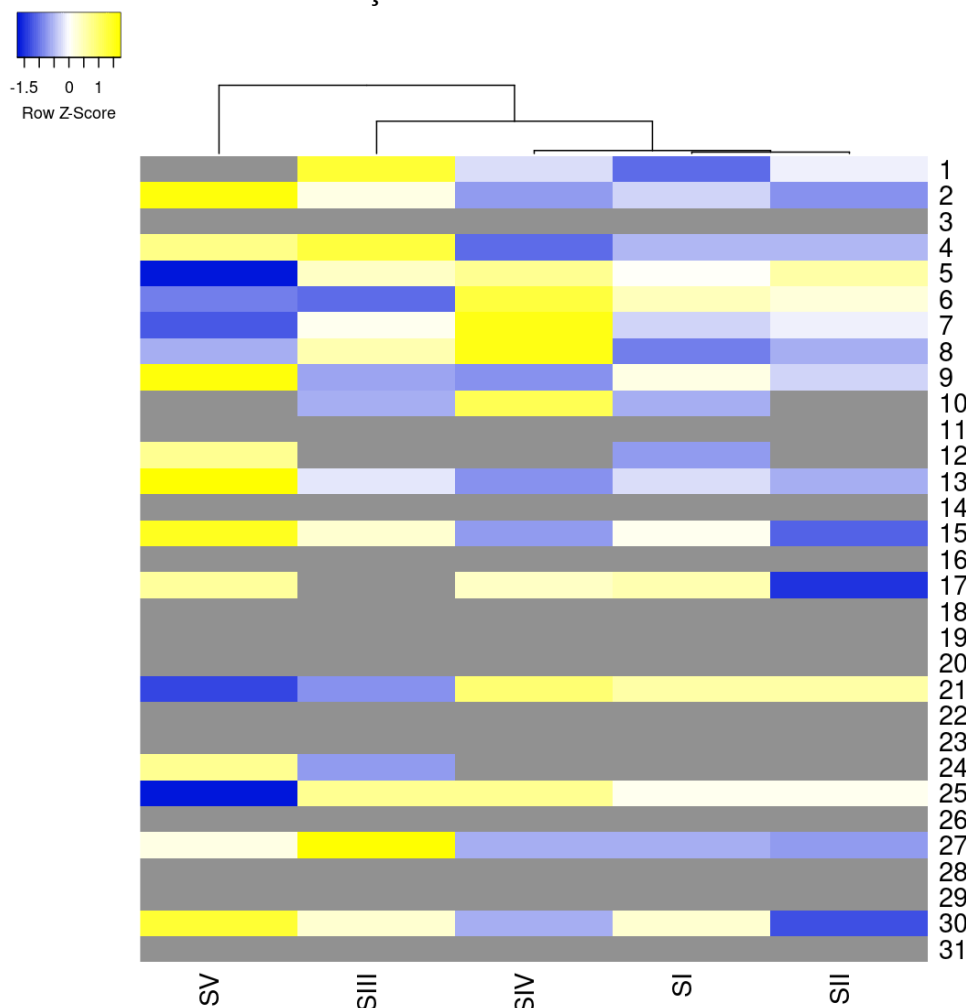
A fermentação também desempenhou um papel fundamental na conversão dos compostos fenólicos adicionados (Daccache *et al.*, 2020; Leonard *et al.*, 2021), influenciando o aumento de compostos como acetato de isobutila, acetato de propila, acetato de butila e palmitato de metila, além da formação de novos compostos como linoleato de etila, 2,3-butanodiol, álcool feniletílico e ácido acético. O 2,3-butanodiol presente na sidra SV pode apresentar notas aromáticas amanteigadas e cremosas, além de poder intensificar o aroma (Li, C.X. *et al.*, 2020). O álcool feniletílico contribui para um aroma agradável, floral, com notas de rosa e doce (Kliks *et al.*, 2021; Li, C.X. *et al.*, 2020; Wei; Zhang; Qiu *et al.*, 2020, 2020; Yu *et al.*, 2019).

Madrera; Bedriñana e Valles (2015), demonstraram que o bagaço de maçã fermentado com leveduras é uma fonte importante de compostos aromáticos, com potencial de uso como aromatizante natural. Este fermentado contém vários compostos voláteis, incluindo acetato de propila, acetato de isoamila, decanoato de isoamila, álcool feniletílico e nonanal. Esses compostos também estão presentes na amostra SV, ampliando a variedade de compostos voláteis na sidra, potencialmente enriquecendo sua complexidade aromática e aumentando aceitabilidade pelo consumidor.

A análise das sidras revelou perfis aromáticos complexos, resultantes da fermentação e da adição de compostos fenólicos da maçã Gala (Lin; Warmund; Kwasniewski, 2024). Importantes variações nos compostos voláteis foram observadas, afetando diretamente o aroma e, conseqüentemente, a aceitabilidade do produto. A adição de compostos fenólicos impactou a composição volátil de forma variável entre as amostras, dependendo das propriedades intrínsecas de cada composto. Por exemplo, a catequina modifica a percepção sensorial de alguns ésteres (Lorrain *et al.*, 2013).

A análise da Figura 4.3 evidencia a maior distinção entre as amostras SV e SIII, revelando perfis de compostos voláteis diferenciados. A sidra SIV apresentou um perfil semelhante à sidra controle (*cluster* formado entre as amostras SI, SII e SIV), embora com maior concentração dos compostos voláteis, principalmente ésteres e alguns álcoois, sugerindo aroma potencialmente mais intenso.

Figura 4.3 - Análise de *clustering* e mapa de calor da distribuição de valores entre as diferentes sidras elaboradas com mosto de maçã



Fonte: A autora

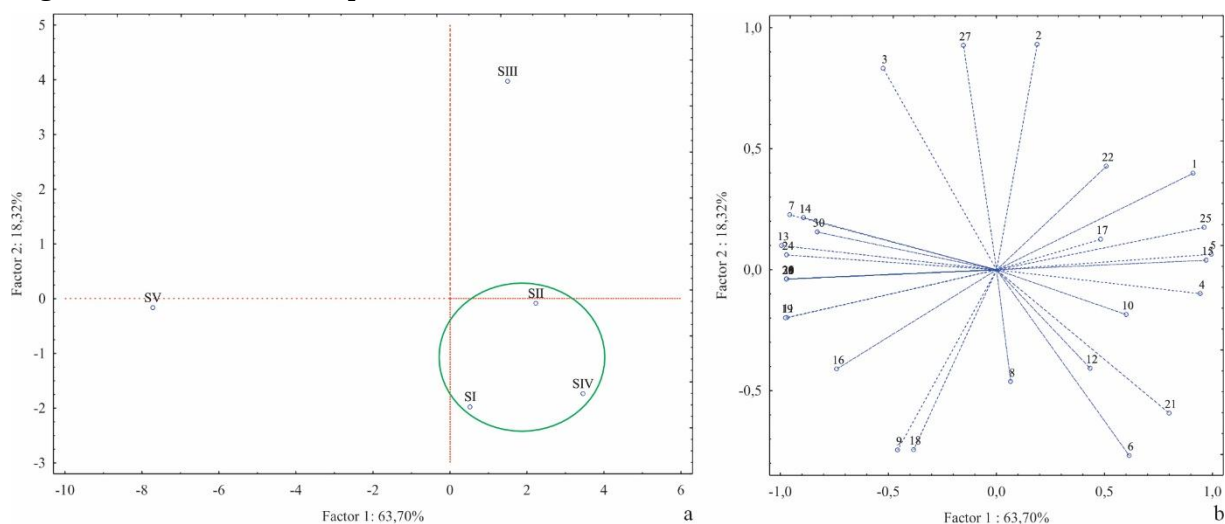
Nota: SI: sidra controle; SII: sidra com floridzina; SIII: sidra com ácido clorogênico; SIV: sidra com 25% de extrato de compostos fenólicos; SV: sidra com 50% de extrato de compostos fenólicos. 1: acetato de etila; 2: acetato de isobutila; 3: isobutirato de etila; 4: acetato de propila; 5: caprilato de etila; 6: caprinato de etila; 7: caproato de etila; 8: acetato de isoamila; 9: acetato de butila; 10: acetato de hexila; 11: 9-decenoato de etila; 12: palmitato de metila; 13: isovalerato de etila; 14: Butanoato de etila; 15: 3-hexenoato de etila; 16: caprilato de isoamila; 17: laurato de etila; 18: decanoato de isoamilo; 19: miristato de etila; 20: linolato de etila; 21: Álcool isoamílico; 22: 1-butanol; 23: 2,3-butanodiol álcool; 24: 2-Metil-1-butanol; 25: 1-hexanol; 26: Álcool feniletílico; 27: Isobutanol; 28: Nonanal; 29: D-limoneno; 30: 2-octanona; 31: ácido acético. Cor cinza: composto não identificado na amostra.

A análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 4.4) foi aplicada para explicar as principais relações entre os compostos voláteis e os diferentes tipos de sidra, visualizando as diferenças entre elas. Os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) explicaram 82,04% da variância total das amostras (64,07% e 17,97%, respectivamente).

Na Figura 4.4a, mostra-se que as sidras SI, SII e SIV apresentaram proximidade nos principais compostos voláteis que influenciam os perfis aromáticos. Em contraste, as sidras SIII

e SV exibiram compostos voláteis distintos, indicando perfis voláteis bem distintos e com características únicas.

Figura 4.4 - PCA dos compostos voláteis das sidras



Fonte: A autora

Nota: Figura a: distribuição das sidras em relação CP1 e CP2. SI: sidra controle; SII: sidra com adição de floridzinha; SIII: sidra com adição de ácido clorogênico, SIV: sidra com adição de 25% de extrato de compostos fenólicos do bagaço de maçã; e SV: sidra com adição de 50% de extrato de compostos de fenólicos do bagaço de maçã. Figura b: distribuição dos compostos voláteis presentes nas sidras em relação aos CP1 e CP2; 1: acetato de etila; 2: isobutirato de etila; 3: acetato de propila; 4: Caproato de etila; 5: Caprilato de etila; 6: caprato de etila; 7: acetato de isobutila; 8: caprilato de isoamila; 9: Laurato de etila; 10: acetato de hexila; 11: acetato de butila; 12: butanoato de etila; 13: isovalerato de etila; 14: 3-hexenoato de etila; 15: 9-decenoato de etila; 16: decanoato de isoamila; 17 acetato de isoamila; 18: miristato de etila; 19: palmitato de metila; 20: linolato de etila; 21: etanol; 22: álcool isoamílico; 23: 2,3-butanoadiol álcool; 24: 2-Metil-1-butanol; 25: 1-hexanol; 26: Álcool feniletil; 27: Isobutanol; 28: Nonanal; 29: D-limoneno; 30: 2-octanona; 31: ácido acético.

Ao analisar as correlações entre os componentes principais e os compostos voláteis, revelaram-se padrões distintos nas sidras analisadas, apresentados na Figura 4.4b. O CP1 associou-se a 26 compostos (24 correlações fortes e 2 fracas), sendo o caprilato de etila (5) o composto com maior correlação a esse eixo. Enquanto isso, sete compostos, com o isobutanol (27) apresentando maior associação, mostraram maior associação com o CP2. O composto butanoato de etila (12) não apresentou correlação com nenhum dos componentes de variação. A orientação de cada composto indica sua contribuição para a variabilidade nos componentes principais. Assim, como os comprimentos dos vetores indicam a variabilidade de cada composto entre as sidras, demonstrando como diferentes aditivos nas sidras afetam seus perfis voláteis, com algumas amostras exibindo perfis aromáticos mais complexos e associações distintas aos diferentes compostos voláteis. As sidras SI e SIII apresentaram maior associação com o componente principal CP2, enquanto as sidras SII e SV mostraram maior ligação ao

CP1. A sidra SIV correlacionou-se com ambos os componentes principais. A correlação entre a sidra SII e o CP1 foi fraca.

A comparação entre as Figuras 4.4a e 4.4b permitiu identificar os compostos mais relevantes para o perfil aromático de cada sidra. A análise de componentes principais revelou que as sidras SIII e SV possuem perfis de compostos aromáticos mais diversificados e distintos dos demais, caracterizados por maior concentração de compostos voláteis e maior variedade de compostos fenólicos (Tabela 4.5). Esses atributos podem conferir aromas únicos e valor funcional a essas bebidas.

As sidras SI, SII e SIV formaram um grupo com características próximas aos compostos principais, conforme demonstrado no cluster da Figura 4.3. A sidra SI, associada aos compostos caprato de etila (6) e caprilato de isoamila (8), podendo apresentar um perfil aromático com notas frutadas, fermentadas e doce (Kliks *et al.*, 2021; Villière *et al.*, 2015). A sidra SII destacou-se pela presença de caprilato de etila (5) e 9-decenoato de etila (15), que conferem notas de rosas, frutadas e fermentadas (Kliks *et al.*, 2021; Villière *et al.*, 2015; Wei; Zhang; Wang *et al.*, 2020). Enquanto, a sidra SIV, com os compostos mais relevantes caproato de etila (4), caprato de etila (6) e álcool isoamílico (21), podendo remeter a um perfil aromático frutado, doce, fermentado, com notas de uísque e malte (Qin; Petersen; Bredie, 2018; Villière *et al.*, 2015).

A amostra SIII caracterizou-se pelos compostos isobutirato de etila (2), acetato de propila (3), 1-butanol (22) e isobutanol (27). O isobutanol pode trazer notas florais, doces, frutadas e de mel (Qin; Petersen; Bredie, 2018). Enquanto, a sidra SV mostrou-se altamente correlacionada com diversos compostos voláteis, incluindo laurato de etila (9), acetato de butila (11), isovalerato de etila (13), palmitato de metila (19), linolato de etila (20), 2,3-butanodiol (23), 2-metil-1-butanol (24), álcool fenilílico (26), nonanal (28), D-limoneno (29) e ácido acético (31). Alguns desses compostos podem contribuir para um aroma complexo, com notas frutadas, cítricas, florais e nuances de mel e maçã madura (Kliks *et al.*, 2021; He *et al.*, 2021, Li, C.X. *et al.*, 2020; Qin; Petersen; Bredie, 2018; Wei; Zhang; Wang *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019). No entanto, o ácido acético presente na amostra pode introduzir notas azedas, semelhantes ao vinagre (Madrera; Bedriñana; Valles, 2015; Qin; Petersen; Bredie, 2018), resultando em um perfil aromático menos desejável. Por fim, altas concentrações de ácidos fenólicos podem acentuar a adstringência e o amargor, percebidos com maior intensidade na degustação (Zhang *et al.*, 2021).

Por outro lado, a sidra SIV (25% de extrato fenólico de bagaço de maçã) destacou-se como promissora para o desenvolvimento de uma bebida com possível perfil aromático complexo e propriedades funcionais. Embora sua formação de compostos voláteis se assemelhe às das sidras SI e SII, a SIV apresentou maior concentração e diversidade desses compostos. Essa estrutura dos compostos voláteis da SIV sugere um aroma mais intenso, com notas frutadas, doces e florais, potencialmente equilibrado pela presença de compostos fenólicos, tornando-a mais agradável ao paladar.

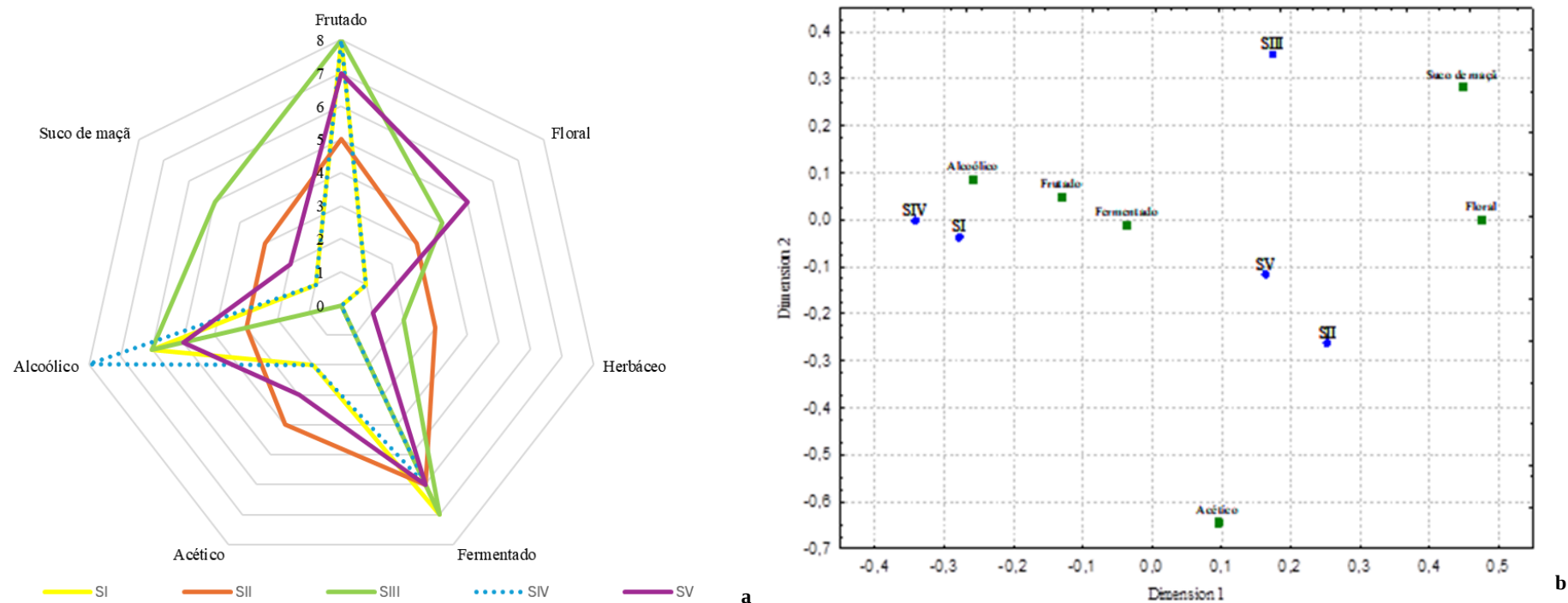
4.3.4 Análise sensorial olfativa

A percepção do aroma das sidras pelos consumidores foi investigada por meio da análise sensorial. A Figura 4.5 ilustra os principais aromas identificados pelos avaliadores, utilizando duas representações: (a) um gráfico do tipo “aranha” baseado em frequência de citação, que mostra a frequência dos atributos aromáticos citados pelos avaliadores em cada amostra, e (b) um mapa de correspondência bidimensional, evidenciando as associações entre os atributos sensoriais e as amostras. As duas dimensões juntas explicam 91,68% da variação total das relações dos dados.

A análise sensorial revelou perfis aromáticos distintos para cada amostra. Apesar da presença de aromas frutados, florais e fermentados em todas as amostras, as frequências variaram (Figura 4.5a). O aroma frutado foi mais mencionado em SI, SIII e SIV, enquanto foi menos percebido em SII. O aroma alcoólico foi o mencionado por todos os avaliadores em SIV.

A amostra SI apresentou alta frequência de aromas frutados e fermentados, mas com maior correlação com o aroma frutado, de acordo com a imagem (b) da Figura 4.5. A sidra SII não se correlacionou claramente com nenhum descritor específico (Figura 4.5b). A SIII destacou-se pela identificação de aromas frutados e de suco de maçã, sugerindo apresentar um perfil mais natural. Além de ser a única amostra que não houve identificação do aroma acético (associado ao vinagre).

Figura 4.5 - Resultado estatístico da identificação das principais notas de aroma



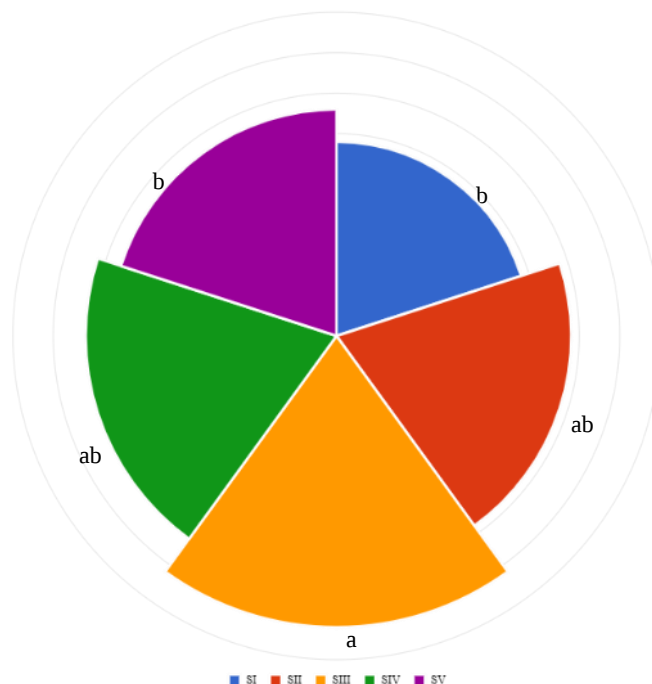
Fonte: A autora.

Nota: **(a)** gráfico aranha com o perfil do aroma a partir das identificações dos avaliadores. **(b)** Gráfico de análise de correspondência. SI: sidra controle; SII: sidra com adição de floridzina; SIII: sidra com adição de ácido clorogênico; SIV: sidra com adição de 25% de extrato de bagaço de maçã; e SV: sidra com adição de 50% de extrato de bagaço de maçã.

A sidra SIV exibiu um perfil aromático equilibrado, combinando os aromas frutado, fermentado e alcoólico. Enquanto, a amostra SV apresentou a maior diversidade de aromas mencionados, mas sem a predominância de um único descritor específico. Sua posição na análise de correspondência (Figura 4.5b) reforçou essa observação, indicando um perfil equilibrado. A análise dos perfis sensoriais descritos pelos avaliadores corrobora a análise dos compostos voláteis (Tabela 4.6), pois a bebida SV apresentou a maior diversidade e quantidade de aromas identificados.

Em relação à análise de complexidade do aroma, as amostras apresentaram uma complexidade moderada, sem diferença estatística significativa. No entanto, a intensidade aromática variou significativamente (Gráfico 4.3). A amostra SIII exibiu a maior percepção de intensidade aromática, embora não diferisse estatisticamente das amostras SII e SIV, formando com elas um grupo de intensidade intermediária. As amostras SV e SI, sem diferença estatística em relação a SII e SIV, apresentaram menor percepção de intensidade aromática, podendo ser classificadas como sidras de intensidade leve. A intensidade aromática pode ser influenciada pela composição dos compostos fenólicos e voláteis, bem como pela interação entre eles (Goldner *et al.*, 2011; Mao *et al.*, 2020; Niu *et al.*, 2019).

Gráfico 4.3 - Intensidade do aroma nas sidras (%)



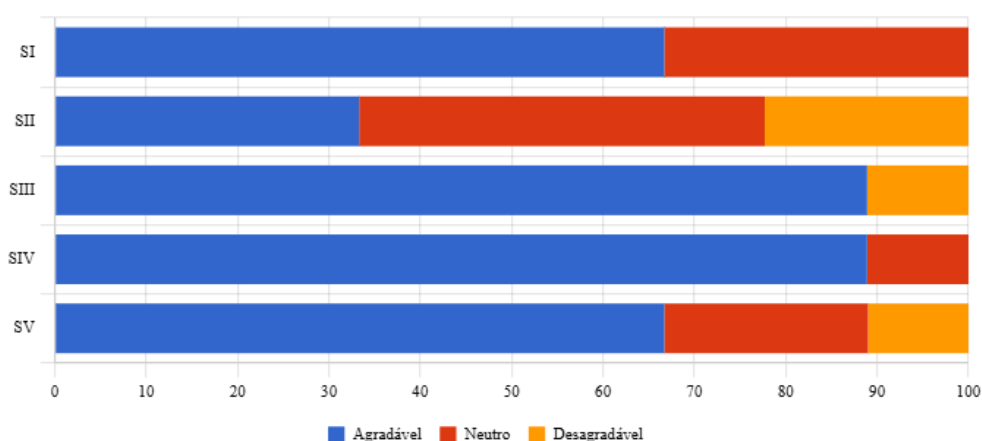
Fonte: A autora

Nota: Gráfico de área polar. Resultados apresentados em porcentagem (%). SI: sidra controle (cor azul); SII: sidra com adição de floridzina (cor vermelha); SIII: sidra com adição de ácido clorogênico (cor laranja); SIV: sidra com adição de 25% de extrato de bagaço de maçã (cor verde); e SV: sidra com adição de 50% de extrato de bagaço de maçã (cor roxa).

A avaliação hedônica (Gráfico 4.4) indicou alta aceitabilidade do aroma da maioria das sidras, com mais de 65% das avaliações positivas. A exceção foi a sidra SII, que obteve apenas cerca de 30% de avaliações agradáveis, enquanto mais de 40% foram neutras e cerca de 25% desagradável. Essa rejeição pode estar relacionada à identificação do aroma acético.

As sidras SI e SIV se destacaram pela ausência de avaliações desagradáveis do aroma. Já as SIII e SV receberam um pouco mais de 10% de avaliações como desagradável. Em geral, as sidras melhor avaliadas foram aquelas com menor identificação de aroma acético e maior identificação de aromas frutados, fermentados, alcoólicos, florais e de suco de maçã. Esses aromas são frequentemente associados à percepção positiva, enquanto a presença de aroma acético é geralmente considerada desagradável (Tarko; Duda, 2024).

Gráfico 4.4 - Análise da aceitabilidade (agradabilidade) do aroma das diversas formulações das Sidras



Fonte: A autora.

Nota: Resultados apresentados em porcentagem (%). SI: sidra controle; SII: sidra com adição de floridzina; SIII: sidra com adição de ácido clorogênico; SIV: sidra com adição de 25% de extrato de bagaço de maçã; e SV: sidra com adição de 50% de extrato de bagaço de maçã.

Esses dados são consistentes com os resultados obtidos na análise de compostos voláteis, apresentados na Tabela 4.6 e na Figura 4.5. As sidras SI e SIV apresentaram perfis de compostos voláteis semelhantes, diferindo principalmente pelas concentrações. Ambas exibiram aromas frutados, porém a SIV exibiu aroma mais intenso, enquanto SI apresentou um perfil mais suave. A sidra SII apresentou o menor número de aromas identificados, em consonância com a menor quantidade de compostos voláteis detectados. Esse menor número de compostos se refletiu na percepção aromática da bebida.

A sidra SIII se destacou por apresentar altas correlações com os compostos presentes na CP2 da PCA (Figura 4.5), possivelmente explicando sua maior intensidade aromática

identificada pelos avaliadores. Por fim, a sidra SV exibiu a maior diversidade e concentração de compostos voláteis, bem como o maior número de aromas identificados na análise sensorial. No entanto, sua intensidade aromática foi menor, fato que pode ser atribuído à interação entre os compostos voláteis ou à presença de outros compostos que podem alterar a percepção de uma nota específica, sobrepondo aromas mais delicados ou menor quantidade (Qin, Petersen e Bredie, 2018).

4.4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a adição de extratos fenólicos de bagaço de maçã impacta significativamente a fermentação, as propriedades bioativas e o perfil volátil das bebidas. A otimização da fermentação alcoólica e a formação de compostos voláteis dessas bebidas indicam o potencial dos compostos fenólicos para aprimorar a qualidade aromática, as características colorimétricas, o teor de fenóis e flavonoides e capacidade antioxidante das bebidas.

Além disso, a avaliação sensorial do aroma revelou alta aceitabilidade das sidras enriquecidas com extratos fenólicos, destacando especialmente a sidra com 25% de adição (SIV), considerada a mais equilibrada em intensidade e complexidade aromática. Esses resultados evidenciam a eficácia da adição de extratos fenólicos na formulação de bebidas, contribuindo para o desenvolvimento de produtos com melhor perfil sensorial e bioativo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese explorou o potencial dos compostos fenólicos extraídos do bagaço de maçã, desde a revisão bibliográfica até a análise experimental de sua secagem e o impacto de sua adição no mosto e no processo de fermentação alcoólica da sidra. De modo geral, os resultados demonstraram contribuições significativas para o avanço do conhecimento sobre o aproveitamento do bagaço de maçã, preservando e aplicando seus compostos fenólicos em bebidas fermentadas. O estudo também contribuiu para o conhecimento sobre os aspectos funcionais e aromáticos da sidra, enriquecendo seu perfil aromático e conferindo maior complexidade.

Com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos ao longo dos quatro capítulos, conclui-se que o objetivo geral desta tese foi atingido com sucesso, comprovando o potencial dos extratos fenólicos do bagaço de maçã em agregar valor funcional e no desenvolvimento de compostos voláteis aromáticos. A pesquisa apresentou alternativas sustentáveis e viáveis para o aproveitamento do subproduto da indústria de maçã.

Dessa forma, o estudo, além de alcançar seus objetivos, incentiva a valorização dos resíduos agroindustriais e fornece novas abordagens para produção sustentável e inovadora de bebidas. A implementação dos extratos fenólicos em processos fermentativos pode ser explorada de forma mais ampla, não apenas para a produção de sidra, mas também para outras bebidas fermentadas, como kombucha, kefir, chás fermentados, vinhos e cervejas artesanais, ampliando o impacto desse conhecimento.

Pesquisas futuras devem priorizar a análise sensorial aprofundada para avaliar a aceitação do consumidor em relação aos perfis sensoriais e a adaptação dos processos para a escala industrial, garantindo viabilidade econômica e sustentabilidade. Além disso, investigações adicionais sobre mecanismos envolvidos nas interações entre compostos fenólicos, leveduras e compostos voláteis podem fornecer resultados importantes para o controle preciso dos perfis de aroma em produtos fermentados.

REFERÊNCIAS

- ACQUAVIA, M. A. *et al.* Analytical methods for extraction and identification of primary and secondary metabolites of apple (*Malus domestica*) fruits: A review. **Separations**, v. 8, n. 7, 2021.
- ADEYEYE, S. A. O.; ASHAOLU, T. J.; BABU, A. S. Food Drying: a review. **Agricultural Reviews**, p. 1–8, 2022.
- AFRIN, S. M.; ACHARJEE, A.; SIT, N. Convective drying of orange pomace at different temperatures and characterization of the obtained powders. **Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 3, p. 1040–1052, 2022.
- AHMED, M. *et al.* Effect of Freeze-Drying on Apple Pomace and Pomegranate Peel Powders Used as a Source of Bioactive Ingredients for the Development of Functional Yogurt. **Journal of Food Quality**, v. 2022, 2022.
- ALBERTI, A. *et al.* Apple wine processing with different nitrogen contents. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 54, n. 3, p. 551–558, 2011.
- ALBERTI, A. *et al.* Optimization of the extraction of phenolic compounds from apples using response surface methodology. **Food Chemistry**, v. 149, p. 151 – 158, 2014.
- ALBERTI, A. *et al.* Impact on chemical profile in apple juice and cider made from unripe, ripe and senescent dessert varieties. **LWT**, v. 65, p. 436 - 443, 2016.
- ALBERTI, A. *et al.* Distribution of phenolic compounds and antioxidant capacity in apples tissues during ripening. **Journal of Food Science and Technology**, v. 54, n. 6, p. 1511–1518, 2017.
- ALBUQUERQUE, J.C. *et al.* Processing of Maranhão mango peels by convective drying and freeze-drying: kinetic study, functional and thermal properties. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 18, p. 6295 – 6309, 2024.
- ALIBAS, I.; YILMAZ, A. Microwave and convective drying kinetics and thermal properties of orange slices and effect of drying on some phytochemical parameters. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 15, p. 8301–8321, 2022.
- ALONSO-SALCES, R. M. *et al.* Polyphenolic Profiles of Basque Cider Apple Cultivars and Their Technological Properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 10, p. 2938–2952, 2004.
- AN, N.-n *et al.* Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame. **Food Chemistry**, v. 373, p. 131412, 2022.
- AN, K. *et al.* Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale Roscoe*): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure. **Food Chemistry**, v. 197, p. 1292–1300, 2016.

AOAC - Official Methods of Analysis. 17th Edition, The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA. Methods 925.10, 65.17, 974.24, 992.16., 2000.

ANCOS, B. DE *et al.* Effects of two different drying methods (freeze-drying and hot air-drying) on the phenolic and carotenoid profile of ‘Ataulfo’ mango by-products. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 12, n. 3, p. 2145–2157, 2018.

ANTONY, A.; FARID, M. Effect of Temperatures on Polyphenols during Extraction. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, 2022.

ARAÚJO, B.Z.R *et al.* Comparative Study of Drying Technologies fo Apple and Ginger Pomace: Kinetic Modeling and Antioxidant Properties. *Processes*, v. 12, 2096, 2024.

ARNOLD, M.; GRAMZA-MICHALOWSKA, A. Recent Development on the Chemical Composition and Phenolic Extraction Methods of Apple (*Malus domestica*)—A Review. **Food and Bioprocess Technology**, p. 2519–2560, 2023.

ARON, P. M.; KENNEDY, J. A. Flavan-3-ols: Nature, occurrence and biological activity. **Molecular Nutrition and Food Research**, v. 52, n. 1, p. 79–104, 2008.

ASIF, M. *et al.* Sustainable utilization of apple pomace and its emerging potential for development of functional foods. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 12, p. 17932–17950, 2024.

BARREIRA, J. C. M.; ARRAIBI, A. A.; FERREIRA, I. C. F. R. Bioactive and functional compounds in apple pomace from juice and cider manufacturing: Potential use in dermal formulations. **Trends in Food Science and Technology**, v. 90, p. 76–87, 2019.

BATIHA, G. E.-S. *et al.* The pharmacological activity, biochemical properties, and pharmacokinetics of the major natural polyphenolic flavonoid: Quercetin. **Foods**, v. 9, n. 374, 2020.

BENVENUTTI, L. *et al.* Effect of addition of phenolic compounds recovered from apple pomace on cider quality. **LWT**, v. 100, p. 348–354, 2019.

BENVENUTTI, L. *et al.* Bioactive compounds recovered from apple pomace as ingredient in cider processing: monitoring of compounds during fermentation. **Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 9, p. 3349–3358, 2022.

BENZIE, I. F.; STRAIN, J. J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. **Anal Biochemistry**, v. 239, n. 1, p. 70–76, 1996.

BHAT, I. M. *et al.* Effect of microwave-assisted vacuum and hot air oven drying methods on quality characteristics of apple pomace powder. **Food Production, Processing and Nutrition**, v. 5, n. 26, 2023.

BHATTI, S.; JHA, G. Current trends and future prospects of biotechnological interventions through tissue culture in apple. **Plant Cell Reports**, v. 29, n. 11, p. 1215–1225, 2010.

- BINGMAN, M. T. *et al.* Monitoring cider aroma development throughout the fermentation process by headspace solid phase microextraction (Hs-spme) gas chromatography–mass spectrometry (gc-ms) analysis. **Beverages**, v. 6, n. 2, p. 1–14, 2020.
- BIRTIC, S. *et al.* Impact of air-drying on polyphenol extractability from apple pomace. **Food Chemistry**, v. 296, p. 142–149, 2019.
- BOATENG, I. D. *et al.* Effect of pulsed-vacuum, hot-air, infrared, and freeze-drying on drying kinetics, energy efficiency, and physicochemical properties of Ginkgo biloba L. seed. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 4, 2021.
- BONDONNO, N. P. *et al.* The cardiovascular health benefits of apples: Whole fruit vs. isolated compounds. **Trends in Food Science and Technology**, v. 69, p. 243–256, 2017.
- BORTOLINI, D. G. *et al.* A new approach to the use of apple pomace in cider making for the recovery of phenolic compounds. **LWT**, v. 126, 2020.
- BOYER, J.; LIU, R. H. Apple phytochemicals and their health benefits. **Nutrition Journal**, v. 3, n. 5, p. 1–15, 2004.
- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. **LWT**, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995.
- BRAGA, C. M. *et al.* Classification of juices and fermented beverages made from unripe, ripe and senescent apples based on the aromatic profile using chemometrics. **Food Chemistry**, v. 141, n. 2, p. 967–974, 2013.
- BRASIL. Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994. Dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas, autoriza a criação da Comissão Intersetorial de Bebidas e dá outras providências. Disponível em: https://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%208.918-1994?OpenDocument. Acesso em: 28 set. 2024.
- BRASIL. Decreto nº 6.871 de 4 de junho de 2009. Regulamenta a Lei no 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. D.O.U - Diário Oficial da União. Brasília - DF, 2009. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Decreto/D6871.htm. Acesso em: 28 set. 2024.
- BÜKER, M. *et al.* Effects of apple pomace as a sucrose substitute on the quality characteristics of compound chocolate and spread. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 10, 2021.
- CAMPO, E. *et al.* Comparison of conventional descriptive analysis and a citation frequency-based descriptive method for odor profiling: An Application to Burgundy Pinot noir wines. **Food Quality and Preference**, v. 21, p. 44–55, 2010.
- CARDOSO, L. S. *et al.* Chill units for apples trees in the region of Vacaria – RS, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, n. 2, p. 289–295, 2015.

CAIRNS, P. *et al.* Effects of Hydroxycinnamates and Exogenous Yeast Assimilable Nitrogen on Cider Aroma and Fermentation Performance. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 80, n. 3, p. 236–247, 2022.

CĂLUGĂR, P. C. *et al.* Mixed Fermentations of Yeasts and Lactic Acid Bacteria as Sustainable Processes to Enhance the Chemical Composition of Cider Made of Topaz and Red Topaz Apple Varieties. **Agronomy**, v. 13, n. 10, 2023.

CARPES, S. T. *et al.* Bio-based films prepared with apple pomace: Volatiles compound composition and mechanical, antioxidant and antibacterial properties. **LWT**, v. 144, 2021.

CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 223, p. 152–167, 2018.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. EMBRAPA - Documentos 276. Planaltina - DF: [s.n.], 2010. Disponível em: <http://www.cpac.embrapa.br>.

CERRI, M. L. *et al.* Assessing the Impact of Simultaneous Co-Fermentation on Malolactic Bioconversion and the Quality of Cider Made with Low-Acidity Apples. **Fermentation**, v. 9, n. 12, 2023.

CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, T. Microwave food processing-A review. **Food Research International**, v. 52, n. 1, p. 243–261, 2013.

COELHO, L. M.; WOSIACKI, G. Avaliação sensorial de produtos panificados com adição de farinha de bagaço de maçã. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 3, n. 30, p. 582–588, 2010.

COSTA, J. M. *et al.* Apple pomace biorefinery: Integrated approaches for the production of bioenergy, biochemicals, and value-added products – An updated review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, 2022.

CURUTCHET, A. *et al.* Consumer response to cake with apple pomace as a sustainable source of fibre. **Foods**, v. 10, n. 3, p. 1–12, 2021.

DACCACHE, M. A.L. *et al.* Impact of the physicochemical composition and microbial diversity in apple juice fermentation process: A review. **Molecules**, v. 25, n. 16, p. 1–16, 2020.

DAVIES, T. *et al.* Phenotypic divergence between the cultivated apple (*Malus domestica*) and its primary wild progenitor (*Malus sieversii*). **PLoS ONE**, v. 17, n. 3 March, 1 mar. 2022.

DELFINO, L. A. *et al.* Evaluation of Moringa and Lavandula extracts as natural antioxidants in tilapia fish burger. **Journal of Culinary Science and Technology**, v. 21, n. 1, p. 36–51, 2023.

DEMIRAY, E., SEKER, A. AND TULEK, Y. Drying Kinetics of Onion (*Allium cepa* L.) Slices with Convective and Microwave Drying. **Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 1817–1827, 2017.

DEUN, E. LE *et al.* HPLC-DAD-MS Profiling of Polyphenols Responsible for the Yellow-Orange Color in Apple Juices of Different French Cider Apple Varieties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 35, p. 7675–7684, 2015.

DHILLON, G. S.; KAUR, S.; BRAR, S. K. Perspective of apple processing wastes as low-cost substrates for bioproduction of high value products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 789–805, 2013.

DINSDALE, M. G. *et al.* Yeast vitality during cider fermentation: Assessment by energy metabolism. **Yeast**, v. 15, n. 4, p. 285–293, 1999.

DRANCA, F.; VARGAS, M.; OROIAN, M. Physicochemical properties of pectin from *Malus domestica* ‘Fălticeni’ apple pomace as affected by non-conventional extraction techniques. **Food Hydrocolloids**, v. 100, 2020.

ELGAMAL, R. *et al.* Thermal Degradation of Bioactive Compounds during Drying Process of Horticultural and Agronomic Products: A Comprehensive Overview. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1–21, 2023.

EL-MESERY, H. S. *et al.* Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics and moisture diffusivity study of apple slices using infrared conveyor-belt dryer. **Journal of Food Science**, v. 89, n. 3, p. 1658–1671, 2024.

ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 4, p. 701–717, 4 mar. 2017.

ESPINO-DÍAZ, M.; SEPÚLVEDA, D. R.; GONZÁLES-AGUILAR, G. Biochemistry of Apple Aroma: A Review. **Biochemistry of Apple Aroma, Food Technol. Biotechnol.**, v. 4, n. 54, p. 375–394, 2016.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT: Statistical Database - Crops and livestock products**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 22 set. 2024.

FĂRCAȘ, A. C. *et al.* Analysis of Fatty Acids, Amino Acids and Volatile Profile of Apple By-Products by Gas Chromatography-Mass Spectrometry. **Molecules**, v. 27, n. 6, 2022.

FATHI, F. *et al.* Emerging drying techniques for food safety and quality: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 21, n. 2, p. 1125–1160, 2022.

FENG, T. Geographical differentiation of Molixiang table grapes grown in China based on volatile compounds analysis by HS-GC-IMS coupled with PCA and sensory evaluation of the grapes. **Food Chemistry: X**, v.15, 2022.

FENG, S. *et al.* Systematic Review of Phenolic Compounds in Apple Fruits: Compositions, Distribution, Absorption, Metabolism, and Processing Stability. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 69, n. 1, p. 7–27, 2021.

FERNANDES, P. A. R. *et al.* Revisiting the chemistry of apple pomace polyphenols. **Food Chemistry**, v. 294, p. 9–18, 2019.

FÉVRIER, H. *et al.* Polyphenol profile, PPO activity and pH variation in relation to colour changes in a series of red-fleshed apple juices. **LWT**, v. 85, p. 353–362, 2017.

FIORAVANÇO, J. C.; SILVEIRA, S. V. DA. Generalidades. *Em*: FIORAVANÇO, J. C.; SANTOS, R. S. DOS (Eds.). **Maçã: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. 1. ed. Brasília-DF: Embrapa - Uva e Vinho, 2013. p. 15–20.

FOUAD, S. *et al.* Physicochemical properties of and volatile compounds in riboflavin fortified cloudy apple juice; study of its effect on job fatigue among Egyptian construction workers. **Heliyon**, v. 7, p. e08246, 2021.

FREITAS, V. O mundo colorido das antocianinas. **Revista de Ciência Elementar**, v. 7, n. 2, 2019.

GARRIDO, J.; BORGES, F. Wine and grape polyphenols - A chemical perspective. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1844–1858, 2013.

GIRSCHIK, L. *et al.* Apple variety and maturity profiling of base ciders using UV spectroscopy. **Food Chemistry**, v. 228, p. 323–329, 2017.

GOLDNER, M. C. *et al.* Influence of Polyphenol Levels on the Perception of Aroma in Vitis vinifera cv. Malbec wine. **South African Journal of Enology and Viticulture**, v.32, n. 1, p. 21-27, 2011.

GOMES, T. A.; FILHO, M. R. F.; ZIELINSKI, A. A. F.; PIETROWSKI, G. A. M.; NOGUEIRA, A. Microbial Levels in Apple Must and Their Association with Fruit Selection, Washing and Sanitization. **Journal of Food Safety**, v. 34, p. 141-149, 2014.

GOSCH, C.; HALBWIRTH, H.; STICH, K. Phloridzin: Biosynthesis, distribution and physiological relevance in plants. **Phytochemistry**, v. 71, n. 8–9, p. 838–843, 2010.

GRISPOLDI, L. *et al.* Apple Pomace as Valuable Food Ingredient for Enhancing Nutritional and Antioxidant Properties of Italian Salami. **Antioxidants**, v. 11, n. 7, 2022.

GUINÉ, R. P. F. *et al.* Apple fermented products: An overview of technology, properties and health effects. **Processes**, v. 9, n. 2, p. 1–25, 2021.

GUO, J.; YUE, T.; YUAN, Y. Impact of polyphenols on the headspace concentration of aroma compounds in apple cider. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 4, p. 1635–1642, 2019.

HADI, M. A. M. EL *et al.* Advances in fruit aroma volatile research. **Molecules**, v. 18, n. 7, p. 8200–8229, 2013.

HAGHIGHI, E. *et al.* Evaporation rates across a convective air boundary layer are dominated by diffusion. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1602–1610, 2013.

HASHIZUME, M.; GORDON, M. H.; MOTTRAM, D. S. Light-induced off-flavor development in cloudy apple juice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 22, p. 9177–9182, 2007.

HAWERROTH, F. J.; NACHTIGALL, G. R. **Comunicado Técnico, 190 - Condições meteorológicas de outono e inverno e suas influências na safra de maçã 2016/17 na região de Vacaria, RS**. Bento Gonçalves - RS: [s.n.], 2016.

HE, W. *et al.* Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Schizosaccharomyces pombe* strains on chemical composition and sensory quality of ciders made from Finnish apple cultivars. **Food Chemistry**, v. 345, 2021.

HE, W. *et al.* Phenolic compound profiles in Finnish apple (*Malus × domestica* Borkh.) juices and ciders fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and *Schizosaccharomyces pombe* strains. **Food Chemistry**, v. 373, 2022.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering**, v. 6, p. 169–174, 1961.

HENRÍQUEZ, C. *et al.* Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. **Journal of Food Engineering**, v. 143, p. 146–153, 2014.

HERAS-RAMÍREZ, M. E. *et al.* Effect of Blanching and Drying Temperature on Polyphenolic Compound Stability and Antioxidant Capacity of Apple Pomace. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 6, p. 2201–2210, 2012.

HOBBI, P. *et al.* Chemical Composition, Antioxidant Activity and Cytocompatibility of Polyphenolic Compounds Extracted from Food Industry Apple Waste: Potential in Biomedical Application. **Molecules**, v. 28, n. 2, 2023.

HOLLIS, Francine H.; HALPERN, Bruce P. Quantitative alcoholic and dealcoholized wine vapor-phase stimuli perceptions using a citation frequency-based method. **Journal of Wine Research**, v. 30, n. 1, p. 78-93, 2019.

HU, D. *et al.* The impact of different drying methods on the physical properties, bioactive components, antioxidant capacity, volatile components and industrial application of coffee peel. **Food Chemistry: X**, v. 19, 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de Maçã**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/maca/br>. Acesso em: 21 set. 2024.

JESUS, R. A. DE *et al.* Antioxidant and antibacterial activity of myrcianthes pungens leaf essential oil. **Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas**, v. 20, n. 2, p. 147–161, 2021.

JIA, Y. *et al.* Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and

vacuum-freeze drying techniques. **Food and Bioproducts Processing**, v. 118, p. 67–76, 2019.

JOARDDER, M. U. H.; KARIM, A. Pore Evolution in Cell Walls of Food Tissue during Microwave-Assisted Drying: An In-Depth Investigation. **Foods**, v. 12, n. 13, 2023.

JOSIMUDDIN, S. K.; KUMAR, M.; RASTOGI, H. review on nutritional and medicinal value of malus domestica with various activity. **International journal of health sciences**, p. 7251–7265, 2022.

KAESWURM, J. A. H. *et al.* Analyzing Bioaccessibility of Polyphenols in Six Commercial and Six Traditional Apples (*Malus domestica* Borkh.) during In Vitro and Ex Vivo Oral Digestion. **Molecular Nutrition and Food Research**, v. 67, n. 22, 2023.

KAHRAMAN, O. *et al.* Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, 2021.

KALINOWSKA, M. *et al.* Apples: Content of phenolic compounds vs. variety, part of apple and cultivation model, extraction of phenolic compounds, biological properties. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 84, p. 169–188, 2014.

KAUSER, S. *et al.* Apple pomace, a bioresource of functional and nutritional components with potential of utilization in different food formulations: A review. **Food Chemistry Advances**, v. 4, 2024.

KEBEDE, B. *et al.* A chemometrics approach comparing volatile changes during the shelf life of apple juice processed by pulsed electric fields, high pressure and thermal pasteurization. **Foods**, v. 7, n. 10, 2018.

KIST, B. B. *et al.* **Anuário Brasileiro da Maçã 2019**. Santa Cruz do Sul: Ed. Gazeta Santa Cruz LTDA, 2019.

KLANOVICZ, J. Toxicidade e produção de maçãs no sul do Brasil. **História, Ciências, Saúde**, v. 17, n. 1, p. 67–85, 2010.

KLIKS, J. *et al.* Changes in the volatile composition of apple and apple/pear ciders affected by the different dilution rates in the continuous fermentation system. **LWT**, v. 147, 2021.

KLOSOWSKI, G. *et al.* Changes in the concentration of carbonyl compounds during the alcoholic fermentation process carried out with *Saccharomyces cerevisiae* yeast. **Polish Journal of Microbiology**, v. 66, n. 3, p. 327–334, 2017.

KOSTYRA, E. *et al.* Characteristics of volatile compounds and sensory properties of mixed organic juices based on kiwiberry fruits. **Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 1–15, 2021.

KRAJEWSKA, A. *et al.* Physicochemical Properties of Dried and Powdered Pear Pomace. **Molecules**, v. 29, n. 3, 2024.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 53–59, 2001.

KRUCZEK, M. *et al.* Phenolic Compounds and Antioxidant Status of Cookies Supplemented with Apple Pomace. **Antioxidants**, v. 12, n. 2, 2023.

KÜÇÜKGÖZ, K. *et al.* Polyphenolic profile, processing impact, and bioaccessibility of apple fermented products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, p. 20, 2024.

KUMAR, N.; GOEL, N. Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. **Biotechnology Reports**, v. 24, 2019.

KUSUMA, H. S. *et al.* Evaluation of drying kinetics, electric and emission study of *Musa paradisiaca* L. leaves using microwave-assisted drying method. **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, 2023.

KVITSCHAL, M. V. *et al.* Melhoramento Genético e Biotecnologia. *Em: FIORAVANÇO, J. C.; SANTOS, R. S. DOS (Eds.). Maçã: o produtor pergunta, a Embrapa responde.* Brasília - DF: Embrapa, p. 29-40, 2013.

LA PEÑA-ARMADA, R. DE; MATEOS-APARICIO, I. Sustainable Approaches Using Green Technologies for Apple By-Product Valorisation as A New Perspective into the History of the Apple. **Molecules**, v. 27, n. 20, p. 1–8, 2022.

LANDAU, E. C.; SILVA, G. A. DA. Evolução da Produção da Maçã (*Malus x domestica*, Rosaceae). *In: GUIMARAES, D. P. (Ed.). Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem vegetal.* Embrapa ed. Brasília, DF: Embrapa Milho e sorgo, 2020. v. 2p. 925–950.

LANG, C. V.; WANG, T.; ZHAO, Y. Investigation of eco-friendly chemical treatments of apple pomace for producing high quality molded pulp biocomposite. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 46, 2021.

LAZZAROTTO, J. J. *et al.* Circular Técnica, 91 - Sidra com padrão tecnológico diferenciado: uma avaliação junto ao setor produtivo da maçã brasileira. **Embrapa Uva e Vinho**, p. 1–20, 2012.

LAZZAROTTO, J. J.; GIRARDI, C. L.; ZANDONÁ, G. P. Circular Técnica, 133 - Parâmetros para investimentos na produção de suco integral de maçã com alto padrão tecnológico. **Embrapa Uva e Vinho**, p. 1–17, 2016.

LEE, J.; CHAN, B. L. S.; MITCHELL, A. E. Identification/quantification of free and bound phenolic acids in peel and pulp of apples (*Malus domestica*) using high resolution mass spectrometry (HRMS). **Food Chemistry**, v. 215, p. 301–310, 2017.

LEÓN, E. A. V. *et al.* Phytochemical content and antioxidant activity of extruded products made from yellow corn supplemented with apple pomace powder. **Food Science and Technology (Brazil)**, v. 42, 2022.

LEONARD, W. *et al.* Fermentation transforms the phenolic profiles and bioactivities of plant-based foods. **Biotechnology Advances**, v. 49, 2021.

LEWANDOWSKA, U. *et al.* Overview of metabolism and bioavailability enhancement of polyphenols. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 50, p. 12183 – 12199, 2013.

LEWIS, W. K. The symposium on drying: The Rate of Drying of Solid Materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 3, p. 427–432, 1921.

LI, C. X. *et al.* The effects of simultaneous and sequential inoculation of yeast and autochthonous *Oenococcus oeni* on the chemical composition of red-fleshed apple cider. **LWT**, v. 124, 2020.

LI, Q. LIN *et al.* Determination of nine bioactive phenolic components usually found in apple juice by simultaneous UPLC-MS/MS. **Food Science and Nutrition**, v. 11, n. 7, p. 4093–4099, 2023.

LI, W. *et al.* Analysis of polyphenols in apple pomace: A comparative study of different extraction and hydrolysis procedures. **Industrial Crops and Products**, v. 147, 2020.

LI, X. *et al.* Antioxidant structure–activity relationship analysis of five dihydrochalcones. **Molecules**, v. 23, n. 5, 2018.

LI, Y. *et al.* The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 148, p. 80–89, 2020.

LI, Z. *et al.* A comprehensive review on phytochemistry, bioactivities, toxicity studies, and clinical studies on *Ficus carica* Linn. leaves. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 137, n. 137, 2021.

LING, M. *et al.* The influence of polyphenol supplementation on ester formation during red wine alcoholic fermentation. **Food Chemistry**, v. 377, 2022.

LIN, Y.; WARMUND, M. R.; KWASNIEWSKI, M. T. Characterization of the Volatile Composition of Fermented Ciders Made from Dessert Apple Cultivars with and Without Maceration. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, 2024.

LITTLESON, B. *et al.* Sensory and Chemical Properties of Virginia Hard Cider: Effects of Apple Cultivar Selection and Fermentation Strategy. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 81, n. 1, p. 141–154, 2023.

LIU, W. *et al.* The flavonoid biosynthesis network in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 23, 2021.

LLAVATA, B. *et al.* Cider apple pomace as a source of nutrients: Evaluation of the polyphenolic profile, antioxidant and fiber properties after drying process at different temperatures. **Food Chemistry: X**, v. 15, 2022.

LORENZINI, M. *et al.* Assessment of yeasts for apple juice fermentation and production of cider volatile compounds. **LWT**, v. 99, p. 224–230, 2019.

LORRAIN, B. *et al.* Influence of phenolic compounds on the sensorial perception and volatility of red wine esters in model solution: An insight at the molecular level. **Food Chemistry**, v. 140, p. 76 – 82, 2013.

LU, X. *et al.* Analysis of the Formation of Characteristic Aroma Compounds by Amino Acid Metabolic Pathways during Fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. **Molecules**, v. 28, n. 7, 2023.

LU, Y.; FOO, L. Y. Antioxidant and radical scavenging activities of polyphenols from apple pomace. **Food Chemistry**, v. 68, p. 81–85, 2000.

LUKA, B. S. *et al.* Convective and microwave drying kinetics of white cabbage (*Brassica oleracea* var capitata L.): Mathematical modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 12, 2023.

LYU, F. *et al.* Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review. **Processes**, v. 8, n. 3, p. 1–15, 2020.

MADEIRA JUNIOR, J. V.; TEIXEIRA, C. B.; MACEDO, G. A. Biotransformation and bioconversion of phenolic compounds obtainment: An overview. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 35, n. 1, p. 75–81, 2015.

MADRERA, R. R.; BEDRIÑANA, R. P.; VALLES, B. S. Production and characterization of aroma compounds from apple pomace by solid-state fermentation with selected yeasts. **LWT**, v. 64, n. 2, p. 1342–1353, 2015.

MAO, D. *et al.* Impact of sensory interactions among volatile compounds of juice of Red Delicious apples. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 61, p. 197-206, 2020.

MARCOTTE, M.; STEWART, B.; FUSTIER, P. Abused Thermal Treatment Impact on Degradation Products of Chilled Pasteurized Orange Juice. **J. Agric. Food Chem.**, v. 46, p. 1991–1996, 1998.

MARHUENDA, J. *et al.* Citrus and Health. *Em*: SAJID M, A. (Ed.). **Citrus - Health Benefits and Production Technology**. Rijeka - Croácia: IntechOpen, p. 1–16, 2019.

MARTINS, F. P. *et al.* Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, p. 0600–0607i, 2020.

MATTJE, L. G. B. *et al.* Ginger essential oil and supercritical extract as natural antioxidants in tilapia fish burger. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 43, n. 5, 2019.

- MAYR, C. M. *et al.* Quantitative Analysis by GC-MS/MS of 18 Aroma Compounds Related to Oxidative Off-Flavor in Wines. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 13, p. 3394–3401, 2015.
- MCGUIRE, R. G. Reporting of Objective Color Measurements. **HortScience**, v. 27, 1992.
- MEDINA, S. *et al.* Differential volatile organic compounds signatures of apple juices from Madeira Island according to variety and geographical origin. **Microchemical Journal**, v. 150, 2019.
- MENA, P. *et al.* Flavan-3-ols, anthocyanins, and inflammation. **IUBMB Life**, v. 66, n. 11, p. 745–758, 2014.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002.
- MILLÁN-LALEONA, A. *et al.* Antioxidant, Antidiabetic, and Anti-Obesity Properties of Apple Pulp Extracts (*Malus domestica* Bork): A Comparative Study of 15 Local and Commercial Cultivars from Spain. **Biology**, v. 12, n. 7, 2023.
- MINNAAR, P. P. *et al.* Schizosaccharomyces pombe and Saccharomyces cerevisiae yeasts in sequential fermentations: Effect on phenolic acids of fermented Kei-apple (*Dovyalis caffra* L.) juice. **International Journal of Food Microbiology**, v. 257, p. 232–237, 2017.
- MONTEIRO, H. S. A.; BRITO, S. DE N. S.; BRONZE, A. B. DA S. **Panorama da produção de maçãs no Brasil: A produção de maçãs no Brasil está em constante evolução e traz ótimas perspectivas para o agronegócio. 2023** Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/panorama-da-producao-de-macas-no-brasil/>>. Acesso em: 5 Nov. 2024.
- MU, Y. *et al.* Optimization of the Fermentation Conditions of Huaniu Apple Cider and Quantification of Volatile Compounds Using HS-SPME-GC/MS. **Metabolites**, v. 13, n. 9, 2023.
- MUGI, V. R.; CHANDRAMOHAN, V. P. Shrinkage, effective diffusion coefficient, surface transfer coefficients and their factors during solar drying of food products – A review. **Solar Energy**, v. 229, p. 84–101, 2021.
- MURTAZA, A. *et al.* Enzymatic, phyto-, and physicochemical evaluation of apple juice under high-pressure carbon dioxide and thermal processing. **Foods**, v. 9, n. 2, 2020.
- MURESAN, A. E. *et al.* Functionality of Muffins Fortified with Apple Pomace: Nutritional, Textural, and Sensory Aspects. **Applied Sciences**, v. 14, p. 6439, 2024.
- MUSIELAK, G.; MIESZCZAKOWSKA-FRĄC, M.; MIERZWA, D. Convective Drying of Apple Enhanced with Microwaves and Ultrasound - Process Kinetics, Energy Consumption, and Product Quality Approach. **Applied Sciences**, v. 14, n. 3, p. 994, 2024.

NANOUE, E.; METAFAS, M.; BASTIAN, S.E.P.; KOTSERIDIS. Revealing the unique characteristics of Greek white wine made from indigenous varieties through volatile composition and sensory properties. **Beverages**, v. 11, n. 33, 2025.

NIEDERBERGER, K. E.; TENNANT, D. R.; BELLION, P. Dietary intake of phloridzin from natural occurrence in foods. **British Journal of Nutrition**, v. 123, n. 8, p. 942–950, 2020.

NI, H. *et al.* Effects of different drying processes on the flavonoids characteristics of Guanxi honey pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peel by HPLC-Q-TOF-MS analysis. **European Food Research and Technology**, v. 250, p. 1987–1998, 2024.

NIKFARDJAM, M. P.; MAIER, D. Development of a headspace trap HRGC/MS method for the assessment of the relevance of certain aroma compounds on the sensorial characteristics of commercial apple juice. **Food Chemistry**, v. 126, n. 4, p. 1926–1933, 2011.

NIU, Y. *et al.* Evaluation of the perceptual interaction among ester aroma compounds in cherry wines by GC–MS, GC–O, odor threshold and sensory analysis: An insight at the molecular level. **Food Chemistry**, v. 275, p. 143–153, 2019.

NOGUEIRA, A. *et al.* Avaliação da fermentação alcoólica do extrato de bagaço de maçã. Avaliação da fermentação alcoólica do extrato de bagaço de maçã. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 2, p. 187–194, 2005.

NOGUEIRA, A. *et al.* Diversificação de negócios na propriedade frutícola: processamento de maçã. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 18734–18742, 2019.

NOGUEIRA, A.; WOSIACKI, G. Sidra. *Em*: VENTURINI FILHO, W. G. (Ed.). **Bebidas alcoólicas: Ciência e Tecnologia**. São Paulo - SP: Blucher, v. 1, p. 113–139, 2010.

NOGUEIRA, A.; WOSIACKI, G. Apple Cider Fermentation. *Em*: YUI, Y. H.; EVRANUZ, E. Ö. (Eds.). **Handbook of plant-based fermented food and beverage technology**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, p. 209–235, 2012.

NUR SYUKRIAH, A. R. *et al.* Effect of solvent extraction on antioxidant and antibacterial activities from *Quercus infectoria* (Manjakani). **International Food Research Journal**, v. 21, n. 3, p. 1067–1073, 2014.

ORELLANA-PALMA, P. *et al.* Influence of cryoconcentration on quality attributes of apple juice (*Malus Domestica* cv. Red Fuji). **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, 2020.

ÖZTÜRK, S.; ŞAKIYAN, Ö.; ÖZLEM ALIFAKI, Y. Dielectric properties and microwave and infrared-microwave combination drying characteristics of banana and kiwifruit. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 3, 2017.

PAGANINI, C. *et al.* Utilization of apple pomace for ethanol production and food fiber obtainment. **Ciênc. agrotec.**, v. 29, n. 6, p. 1231–1238, 2005.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. West Lafayette: Purdue University, 1949.

PANDO BEDRIÑANA, R. *et al.* Characteristics of ice juices and ciders made by cryo-extraction with different cider apple varieties and yeast strains. **Food Chemistry**, v. 310, 2020.

PARKER, J. K. Introduction to aroma compounds in foods. *Em*: PARKER, J. K.; ELMORE, J. S.; METHVEN, L. (Eds.). **Flavour Development, Analysis and Perception in Food and Beverages**. [s.l.] Elsevier, v. e Book collection, p. 3–30, 2015.

PASCARIU, S. M.; POP, I. M.; ALBU, A. Degradation Degree of Polyphenols Depending on the Drying Temperature of the Grape Pomace. **Bulletin UASVM Animal Science and Biotechnologies**, v. 71, n. 2, p. 212–217, 2014.

PATOCKA, J. *et al.* Malus domestica: A review on nutritional features, chemical composition, traditional and medicinal value. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1–19, 2020.

PENG, W. *et al.* Effect of the apple cultivar on cloudy apple juice fermented by a mixture of Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus plantarum, and Lactobacillus fermentum. **Food Chemistry**, v. 340, 2021.

PERAZZOLLI, M. *et al.* Characterization of resistance gene analogues (RGAs) in apple (Malus x domestica Borkh.) and their evolutionary history of the Rosaceae family. **PLOS ONE**, v. 9, n. 2, p. 1–11, 2014.

PERESTRELO, R. *et al.* Differentiation of fresh and processed fruit juices using volatile composition. **Molecules**, v. 24, n. 5, 2019.

PEREZ-JIMÉNEZ, M.; CHAYA, C.; POZO-BAYÓN, M. Á. Individual differences and effect of phenolic compounds in the immediate and prolonged in-mouth aroma release and retronasal aroma intensity during wine tasting. **Food Chemistry**, v. 285, p. 147–155, 2019.

PETIKIRIGE, J.; KARIM, A.; MILLAR, G. Effect of drying techniques on quality and sensory properties of tropical fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 11, p. 6963–6979, 2022.

PETRI, J. L. *et al.* Avanços na cultura da macieira no Brasil. **Rev. Bras. Frutic.**, v. especial, p. 48–056, 2011.

PINTO-NETO, W. P. *et al.* Optimizing the production of wheat beer by recycling the yeast biomass: perspective for cost reduction with quality maintenance. **Food Science and Technology**, v. 43, 2023.

PITTARI, E.; MOIO, L.; PIOMBINO, P. Interactions between polyphenols and volatile compounds in wine: A literature review on physicochemical and sensory insights. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1–29, 1 fev. 2021.

PLOYON, S.; MORZEL, M.; CANON, F. The role of saliva in aroma release and perception. **Food Chemistry**, v. 226, p. 212–220, 2017.

PODSE, A. *et al.* Compositional characterization of some apple varieties. **Eur Food Res Technol**, v. 210, p. 268–272, 2000.

POLAT, S. *et al.* Comparative elucidation of colour, volatile and phenolic profiles of black carrot (*Daucus carota* L.) pomace and powders prepared by five different drying methods. **Food Chemistry**, v. 369, 2022.

QIN, Z.; PETERSEN, M. A.; BREDIE, W. L. P. Flavor profiling of apple ciders from the UK and Scandinavian region. **Food Research International**, v. 105, p. 713–723, 2018.

QUILES, A. *et al.* Fiber from fruit pomace: A review of applications in cereal-based products. **Food Reviews International**, v. 34, n. 2, p. 162–181, 2018.

RAMAKRISHNA, A.; RAVISHANKAR, G. A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. **Plant Signaling and Behavior**, v. 6, n. 11, p. 1720–1731, Nov. 2011.

RANZAN, A. P. S. *et al.* Mercado Brasileiro da Maçã e a Sidra. **Vetor**, v. 34, n. 1, p. 58–67, 2024.

RE, R. *et al.* Antioxidante activity applying and improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology & Medicine**, v. 26, n. 9/10, p. 1231–1237, 1999.

RIZZON, L. A.; BERNARDI, J.; MIELE, A. Características Analíticas dos Sucos de Maçã Gala, Golden Delicious e Fuji. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 4, n. 25, p. 750–756, 2005.

ROBERTS, G.; SPADAFORA, N. D. Analysis of Apple Flavours: The Use of Volatile Organic Compounds to Address Cultivar Differences and the Correlation between Consumer Appreciation and Aroma Profiling. **Journal of Food Quality**, v. 2020, 2020.

ROBINSON, A. *et al.* Interactions between wine volatile compounds and grape and wine matrix components influence aroma compound headspace partitioning. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, p. 10313 – 10322, 2009.

SANTOS, C. M. E. DOS *et al.* Apple aminoacid profile and yeast strains in the formation of fusel alcohols and esters in cider production. **Journal of Food Science**, v. 80, n. 6, p. C1170–C1177, 2015.

SANTOS, C. M. E. DOS *et al.* Supplementation of amino acids in apple must for the standardization of volatile compounds in ciders. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 122, n. 2, p. 334–341, 2016.

SANTOS, T. P. M. *et al.* Effect of sulphur dioxide concentration added at different processing stages on volatile composition of ciders. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 124, n. 3, p. 261–268, 2018.

SAPKOTA, G. *et al.* Preservation of phenols, antioxidant activity, and cyclic adenosine monophosphate in jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruits with different drying methods. **Plants**, v. 12, n. 9, 2023.

SEVINDIK, O. *et al.* Grape seed oil volatiles and odour activity values: a comparison with Turkish and Italian cultivars and extraction methods. **Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 1968–1981, 2022.

SILVA, P. F. *et al.* Photoprotection and the photophysics of acylated anthocyanins. **Chemistry - A European Journal**, v. 18, n. 12, p. 3736–3744, 2012.

SIMÕES, DEISE R.S.; WASZCZYNSKYJ, N.; WOSIACKI, G. Aromas em Maçãs, Suco e Sidra: Revisão. **B. CEPPA**, v. 27, n. 1, p. 153–172, 2009.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **Phenolics Determination**, p. 144–59, 1965.

SKINNER, R. C. *et al.* A comprehensive analysis of the composition, health benefits, and safety of apple pomace. **Nutrition reviews**, v. 76, n. 12, p. 893–909, 2018.

SMIT, G. *et al.* Enzymatic conversions involved in the formation and degradation of aldehydes in fermented products. *Em: BREDIE, W. L. P.; PETERSEN, M. A. (Eds.). Flavour Science: Recent Advances and Trends*. [s.l.] Elsevier, v. 43p. 79 - 84, 2006.

SOARES, M. C. *et al.* Composition of phenolic acids content in apple (*Malus sp.*) pomace. Composition of phenolic acids content in apple (*Malus sp.*) pomace. **Semina: Ciência Agrárias**, v. 29, n. 2, p. 339–347, 2008.

SOBCZAK, P. *et al.* Technology for Apple Pomace Utilization within a Sustainable Development Policy Framework. **Sustainability**, v. 14, n. 9, 2022.

SOLA, I. M. M. S. *et al.* Impact of Pure, Co-, and Sequential Fermentations with *Hanseniaspora sp.* and *Saccharomyces cerevisiae* on the Volatile Compounds of Ciders. **Fermentation**, v. 10, n. 4, p. 177, 2024.

SONG, J. *et al.* A Physiogenomic Study of the Tolerance of *Saccharomyces cerevisiae* to Isoamyl Alcohol. **Fermentation**, v. 10, n. 1, 2024.

SOOMRO, T. *et al.* Cider and dessert apples: What is the difference? **Plants People Planet**, v. 4, n. 6, p. 593–598, 2022.

SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. DE A.; RASSINI, J. B. **Circular Técnica 33: Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno micro-ondas doméstico**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. São Carlos - SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2002.

STAROWICZ, M. Analysis of volatiles in food products. **Separations**, v. 8, n. 9, 17 set. 2021.

STOMPOR, M.; BRODA, D.; BAJEK-BIL, A. Dihydrochalcones: Methods of acquisition and pharmacological properties - A first systematic review. **Molecules**, v. 24, 2019.

SUN, X. *et al.* Phased diploid genome assemblies and pan-genomes provide insights into the genetic history of apple domestication. **Nature Genetics**, v. 52, n. 12, p. 1423–1432, 2020.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS (TBCA). **Universidade de São Paulo (USP). Food Research Center (FoRC). Versão 7.2. São Paulo.** Disponível em: <http://www.fcf.usp.br/tbca>. Acesso em: 26 set. 2024.

TARKO, T.; DUDA, A. Volatilomics of fruit wines. **Molecules**, v. 29, n. 2457, 2024.

TAVARES, C. *et al.* Effects of Different Irrigation Regimes, Nitrogen Levels and Storage Conditions on Volatiles of ‘Gala’ Apple. **Molecules**, v. 28, n. 18, p. 6610, 2023.

TEYMORI-OMRAN, M. *et al.* Enhancing energy efficiency and retention of bioactive compounds in apple drying: comparative analysis of combined hot air–infrared drying strategies. **Applied Sciences**, v. 13, n. 13, 2023.

TIAN, Z. *et al.* Wild apples are not that wild: conservation status and potential threats of *malus sieversii* in the mountains of central asia biodiversity hotspot. **Diversity**, v. 14, n. 6, 2022.

TULEJ, W.; GŁOWACKI, S. Modeling of the drying process of apple pomace. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, 2022.

TZE, N. L. *et al.* Physicochemical and nutritional properties of spray-dried pitaya fruit powder as natural colorant. **Food Science and Biotechnology**, v. 21, n. 3, p. 675–682, 2012.

TZIN, V.; GALILI, G. New Insights into the shikimate and aromatic amino acids biosynthesis pathways in plants. **Molecular Plant**, v. 3, n. 6, p. 956–972, 2010.

VEGA-GÁLVEZ, A. *et al.* Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. **Food Chemistry**, v. 132, n. 1, p. 51–59, 2012.

VERDU, C. F. *et al.* Polyphenol variability in the fruits and juices of a cider apple progeny. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 7, p. 1305–1314, 2014.

VILELA, A. *et al.* Beverage and food fragrance biotechnology, novel applications, sensory and sensor techniques: An overview. **Foods**, v. 8, n. 12, 2019.

VILLIÈRE, A. *et al.* Influence of cider-making process parameters on the odourant volatile composition of hard ciders. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 121, n. 1, p. 95–105, 2015.

VLAD, C. C. *et al.* Upgrading the Functional Potential of Apple Pomace in Value-Added Ingredients with Probiotics. **Antioxidants**, v. 11, n. 10, 2022.

WALKER, G. M.; STEWART, G. G. *Saccharomyces cerevisiae* in the production of fermented beverages. **Beverages**, v. 2, n. 4, p. 1–12, 2016.

- WANG, C. *et al.* Coffee flavour modification through controlled fermentations of green coffee beans by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia kluyveri*: Part I. Effects from individual yeasts. **Food Research International**, v. 136, 2020.
- WANG, R. *et al.* Power control in microwave drying of green turnip. **Drying Technology**, v. 40, n. 10, p. 2153–2163, 2022.
- WANG, S. *et al.* Investigating the effect of three phenolic fractions on the volatility of floral, fruity, and aged aromas by HS-SPME-GC-MS and NMR in model wine. **Food Chemistry: X**, v.13, 2022.
- WANG, X. JIE *et al.* Phenolic matrix effect on aroma formation of terpenes during simulated wine fermentation – Part I: Phenolic acids. **Food Chemistry**, v. 341, 2021.
- WANG, Z. *et al.* Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 2, p. 536–544, 2007.
- WANG, Z. *et al.* Fermentation process effects on fermented McIntosh apple ciders. **Fermentation**, v. 10, n. 3, 2024.
- WAY, M. L. *et al.* A comparison of laboratory analysis methods for total phenolic content of cider. **Beverages**, v. 6, n. 3, p. 1–11, 2020.
- WEI, J.; ZHANG, Y.; QIU, Y.; *et al.* Chemical composition, sensorial properties, and aroma-active compounds of ciders fermented with *Hanseniaspora osmophila* and *Torulaspora quercuum* in co- and sequential fermentations. **Food Chemistry**, v. 306, 2020.
- WEI, J.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; *et al.* Assessment of chemical composition and sensorial properties of ciders fermented with different non-*Saccharomyces* yeasts in pure and mixed fermentations. **International Journal of Food Microbiology**, v. 318, 2020.
- WETERINGS, M. *et al.* A classification scheme for interfacial mass transfer and the kinetics of aroma release. **Trends in Food Science and Technology**, v. 105, p. 433–448, 2020.
- WILCZYŃSKI, K.; KOBUS, Z.; DZIKI, D. Effect of press construction on yield and quality of apple juice. **Sustainability**, v. 11, n. 13, 2019.
- WOJDYŁO, A. *et al.* Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method. **Food Chemistry**, v. 207, p. 170–179, 2016.
- WOSIACKI, G.; PHOLMAN, B. C.; NOGUEIRA, A. Características de qualidade de cultivares de maçã: avaliação físico-química e sensorial de quinze cultivares. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 3, p. 347–352, 2004.
- WU, X.; ZHONG, Q.; ZHANG, Y. Effects of Caffeic Acid and Chlorogenic Acid Addition on the Chemical Constituents of Lychee Wine Fermented with *Saccharomyces cerevisiae*. **Fermentations**, v. 9, n. 5, p. 451, 2023.

WU, Y. *et al.* Chemical Composition and Flavor Characteristics of Cider Fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and non-*saccharomyces cerevisiae*. **Foods**, v. 12, n. 19, 2023.

XIAO, M. *et al.* Effect of Chlorogenic Acid on Fermentation Characteristics of *Saccharomyces cerevisiae*. **Shipin Kexue/Food Science**, v. 42, n. 6, p. 88–93, 2021.

XU, D. *et al.* Antioxidant activities of quercetin and its complexes for medicinal application. **Molecules**, v. 24, n. 6, 2019.

YANG, R.; CHEN, J. Recent application of artificial neural network in microwave drying of foods: a mini review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 14, p. 6202–6210, 2022.

YE, M.; YUE, T.; YUAN, Y. Evolution of polyphenols and organic acids during the fermentation of apple cider. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 14, p. 2951–2957, 2014.

YU, H. *et al.* Characterization of key aroma compounds in Chinese rice wine using gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry. **Food Chemistry**, v. 293, p. 8–14, 2019.

ZARDO, D. M. *et al.* Intensidade de pigmentação vermelha em maçãs e sua relação com os teores de compostos fenólicos e capacidade antioxidativa. **Ciênc. Tecnol. Aliment**, v. 29, n. 1, p. 148–154, 2009.

ZARDO, D. M. *et al.* Influence of solvents in the extraction of phenolic compounds with antibacterial activity from apple pomace. **Separation Science and Technology (Philadelphia)**, v. 56, n. 5, p. 903–911, 2021.

ZHANG, B. *et al.* The implication of phenolic acid matrix effect on the volatility of ethyl acetate in alcohol-free wine model: Investigations with experimental and theoretical methods. **Food Chemistry**, v. 378, 2022.

ZHANG, M. *et al.* Comparison of different drying technologies for kiwifruit pomace: Changes in physical characteristics, nutritional properties and antioxidant capacities. **Food Chemistry**, v. 451, 2024.

ZHANG, P. *et al.* Wine phenolic profile altered by yeast: Mechanisms and influences. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 4, p. 3579–3619, 2021.

ZHANG, Y. *et al.* Effects of feedstock characteristics on microwave-assisted pyrolysis – A review. **Bioresource Technology**, v. 230, p. 143–151, 2017.

ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. **Analytical, Nutritional and Clinical Methods Section**, v. 64, 1999.

ZHU, D. *et al.* Effects of different processing steps on the flavor and colloidal properties of cloudy apple juice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 9, p. 3819–3826, 2021.